

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

О. В. ДОНЕЦЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з курсу

**ТЕОРІЯ ТА РОЗРАХУНОК
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ**

*(для студентів 5 курсу всіх форм навчання та слухачів другої вищої освіти
спеціальності 7.05070203, 8.05070203 «Електричний транспорт»)*

**Харків
ХНАМГ
2013**

Донець О. В. Конспект лекцій з курсу "Теорія та розрахунок електрообладнання рухомого складу" (для студентів 5 курсу всіх форм навчання та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070203, 8.05070203 «Електричний транспорт») / О. В. Донець; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2013. – 87 с.

Автор: к.т.н., доц. каф. ЕТ О. В. Донець

Рецензент: доц. В. П. Андрійченко

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту,
протокол № 2 від 12 жовтня 2010 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 ПУСК ТА РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ.....	6
1.1 Регулювання струму збудження тягових машин	6
1.1.1 Регулювання опору гальмівного резистора.....	7
1.1.2 Регулювання координат електроприводу з ДПТ зміною напруги якоря.....	8
1.2 Енергетика електропривода.....	9
1.2.1 Втрати в сталих режимах.....	11
1.2.2 Втрати в перехідних режимах.....	13
1.3 Пуск і гальмування тролейбуса	16
1.3.1 Пуск тролейбуса.....	16
1.3.2 Резистори.....	18
1.3.3 Контролери.....	19
1.3.4 Автоматичні вмикачі, вимикачі й запобіжники	20
1.3.5 Заходи безпеки.....	23
2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ.....	25
2.1 Електричне гальмування.....	26
2.2 Реостатне гальмування при послідовному збудженні тягових двигунів.....	28
2.2.1 Процес самозбудження.....	28
2.2.2 З'єднання генераторів.....	31
2.3 Рекуперативне гальмування.....	34
2.4 Електрична схема тролейбуса ЗіУ і алгоритм її роботи.....	38
2.5 Розрахунок сил тяги і уповільнення.....	45
2.5.1 Розрахунок сил які діють на тролейбус під час руху.....	45
2.5.2 Розрахунок сил зчеплення.....	47
2.5.3 Розрахунок сил опору руху.....	47
2.5.4 Розрахунок сили тяги.....	48
2.5.5 Розрахунок сили гальмування.....	49
2.6 Вибір тиристора, що замикається, - ГТО.....	50
2.6.1 Характеристика тиристора, що замикається.....	50
2.6.2 Система керування.....	53

3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ВАГОНІВ	
МЕТРОПОЛІТЕНУ.....	55
3.1. Рекуперативне гальмування	55
3.2. Імпульсний безреостатний пуск й рекуперативно-реостатне гальмування тягових машин.....	56
3.3. Реостатно-контакторне керування.....	59
3.3.1 Реостатний пуск.....	59
3.3.2 Реостатне гальмування.....	61
3.4. Схема силових кіл вагонів 81.714, 81.717.....	64
3.4.1 Розрахунок головних тиристорів.....	65
3.4.2 Допоміжні тиристори.....	67
3.4.3 Режим гальмування.....	71
3.4.4 Кола керування.....	77
4. ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ.....	80
4.1. Призначення захисту.....	80
4.2. Захист від перевантажень і коротких замикань.....	81
4.3. Захист від надмірних підвищень і понижень напруги.....	83
Список джерел.....	86

ВСТУП

Характерною особливістю швидкорослого сучасного міста є розмежування міської території на відособлені промислові і житлові масиви. В містах зводяться крупні спортивні комплекси, культурні і торгові центри, в передмістях виникають зони масового відпочинку.

Ці обставини значною мірою підвищують потребу мешканців міст в переміщеннях, приводить до швидкого зростання так званої «транспортної рухливості» населення.

Безперервне вдосконалення методів оглядів і ремонтів рухомого складу, зростання технічної оснащеності ремонтних баз, спеціалізація і кооперація, упровадження новітніх технологічних процесів, чітка організація механізація і автоматизація виробництва сприятиме подальшому підвищенню якості обслуговування пасажирів міським транспортом при одночасному зниженні собівартості експлуатації рухомого складу.

Якість технічного обслуговування і ремонту зумовлює техніко-економічні показники роботи рухомого складу на лінії, його надійність, безпеку руху.

Сучасний парк міських депо укомплектований в основному рухомим складом, що виробив свій ресурс експлуатації. В зв'язку з цим актуальною є задача ремонту рухомого складу, в першу чергу, його електроустаткування.

Зменшення витрати електричної енергії при заданих швидкостях повідомлення визначаються властивостями тягових машин і системою електроприводу і можуть бути зменшені шляхом їх вдосконалення.

У сучасних імпульсних перетворювачах як комутуючі ключі застосовані напівпровідникові прилади, що забезпечують частоту комутації від 1 до 25кГц. При цьому електромагнітна постійна часу двигуна значно більше часу комутації імпульсного перетворювача, пульсації струму і відповідно втрати в обмотці якоря істотно понижені (ККД складає 89%).

Велика частина кінетичної енергії в процесі реостатного гальмування перетворюється в теплову, яка виділяється у вигляді втрат в гальмівних резисторах, тягових машинах, передатних механізмах і гальмівних колодках.

1. ПУСК ТА РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ

1.1 Регулювання струму збудження тягових машин

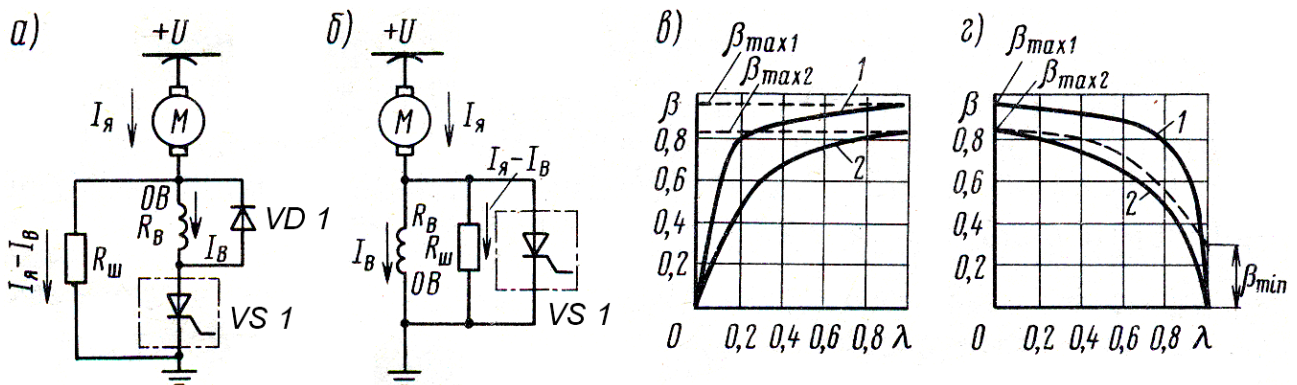


Рис. 1.1 – Схема а – послідовне включення;
б – паралельне включення регулятора

Імпульсне регулювання струму збудження здійснюється зміною відносній тривалості імпульсів напруги, що прикладаються до обмотки збудження. Ці імпульси формуються переривником, при роботі якого з частотою f обмотка збудження одну частину кожного періоду виявляється зашунтованою резистором $R_{ш}$, а іншу — замкнутою накоротко (рис. 1.1).

Амплітуда імпульсу напруги U_B , що прикладається до обмотки збудження, дорівнює падінню напруги на резисторі $R_{ш}$, через який замикається різниця струмів обмоток якоря I_a і збудження I_B , тобто $U_B = R_{ш}(I_a - I_B)$.

Відносна тривалість імпульсу напруги залежно від схеми підключення переривника до обмотки збудження дорівнює або коефіцієнту λ заповнення, з яким працює переривник [у схемі з послідовним включенням переривника (рис. 1.1, а) при його замкнутому стані обмотка збудження ОЗ шунтована резистором], або $1-\lambda$ [у схемі з паралельним включенням переривника (рис.1.1, б) при його замкнутому стані ОЗ замкнута накоротко]. Середня напруга, що прикладається до обмотки збудження, для цих схем:

$$U_{вср.посл} = (I_a - I_B) R_{ш\lambda}; \quad (1.1)$$

$$U_{б\text{ ср.пар}} = (I_a - I_B) / R_{ш}(1 - \lambda). \quad (1.2)$$

1.1.1 Регулювання опору гальмівного резистора

За допомогою імпульсного регулятора можна здійснювати плавне регулювання опору гальмівного резистора, що дозволяє в процесі динамічного гальмування тягової машини підтримувати необхідні значення струму в обмотці якоря і гальмівної сили. Регулятор VI (рис. 1.2), включений паралельно гальмівному резистору R_T , працює з частотою f . Протягом частини періоду λT , коли переривник знаходиться в провідному стані, напруга на затисках тягової машини практично дорівнює нулю. Іншу частину періоду $(1-\lambda)$, коли переривник не проводить струму, напруга на затисках тягової машини рівна $I_a R_T$.

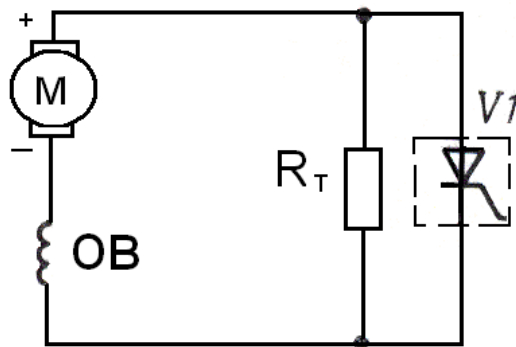


Рис. 1.2 – Схема реостатного гальмування тягової машини

Середня за період напруга на затисках тягової машини

$$U_{\text{дв ср}} = I_a R_T (1 - \lambda) \quad (1.3)$$

Струм в обмотці якоря

$$I_a = E / [R_T (1 - \lambda) + \sum R_{\text{я}}] \quad (1.4)$$

де E — е.р.с. тягової машини;

$\sum R_{\text{я}}$ — сумарний опір кола тягової машини, що включає опір обмоток якоря і збудження і щіткового контакту.

В процесі гальмування і зниження швидкості руху вагону е.р.с. і $U_{\text{дв ср}}$ зменшуються, у зв'язку з чим для підтримки $I_a = \text{const}$ необхідно регулювати ефективний опір $R_{\text{еф}} = R_T (1 - \lambda)$ гальмівного резистора шляхом зміни коефіцієнта λ .

За допомогою імпульсного регулятора опір гальмівного резистора можна змінювати практично від R_T до нуля. В процесі регулювання опору гальмівного резистора струм в обмотці якоря тягової машини одну частину періоду замикається через резистор R_T , а іншу — через переривник. У інтервалі кожного періоду опір кола тягової машини різко міняється, що викликає пульсації струму в обмотці якоря. Проте ці пульсації, як правило, невеликі і обмежуються на $(0,15 \div 0,2) I_{\text{я ном}}$ індуктивностями обмоток тягової машини, а в окремих випадках індуктивністю спеціального згладжуючого реактора.

1.1.2 Регулювання координат електроприводу з ДПС зміною напруги якоря

Даний спосіб широко використовується для регулювання будь-яких координат ЕП при високих вимогах до показників його якості.

Реалізація цього способу передбачає живлення якоря ДПС НЗ від перетворювача, вихідна напруги якого регулюється по величині і може змінюватися при необхідності по полярності.

Оскільки основним джерелом живлення ЕП служить мережа змінного струму, то таким перетворювачем є керований випрямляч (УВ).

Схема отримала назву «Система УВ – Д»

Напруга на виході УВ унаслідок наявності його внутрішнього опору $R_{\text{п}}$ визначається як

$$U = E_{\text{п}} - I_{\text{п}} R_{\text{п}} \quad (1.5)$$

Обмотка збудження ДПС НЗ живиться від окремого джерела постійного струму, наприклад, некерowanego або керованого випрямляча.

При зміні ЕРС УВ пропорційно змінюється швидкість ідеального холостого ходу ω_0 , а штучні характеристики залишаючись лінійними і паралельними один одному, мають в порівнянні з природною характеристикою ДПС НЗ невеликий нахил із-за наявності опору $R_{\text{п}}$.

Характеристики розташовуються у всіх чотирьох квадрантах паралельно один одному; при $E_{\text{п}}=0$ ДПС працює в режимі динамічного гальмування.

Характеристики побудовані відповідно при наступних значеннях ЕДС УВ:

$$E_{п2} > E_{п3} > E_{п4};$$

$$E_{п5} = 0;$$

$$E_{п6} = - E_{п4}; \quad E_{п7} = - E_{п3}; \quad E_{п8} = - E_{п2}.$$

Керований випрямляч виконується у вигляді електромашинної системи «генератор – двигун» (Г-Д) або системи перетворювач «тиристорний перетворювач – двигун» (ТП-Д).

1.2 Енергетика електропривода

Основне призначення електроприводу – перетворювати електричну енергію в механічну і управляти цим процесом. У зв'язку з цим енергетичні показники і характеристики електроприводу мають першорядне значення, тим паче, що електропривод споживає близько 60-65% електроенергії, виробленої в країні.

Будь-який процес передачі і перетворення енергії супроводиться її втратами, тобто вхідна потужність $P_{вх}$ завжди більше вихідної $P_{вих}$ на величину втрат P , і дуже важливо, наскільки великі ці втрати.

Енергетичну ефективність процесу в даний момент зазвичай оцінюють за допомогою коефіцієнта корисної дії (ККД), визначуваної як

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{P_{вих}}{P_{вих} + \Delta P} = \frac{P_{вх} - \Delta P}{P_{вх}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{вх}}. \quad (1.6)$$

Важливими енергетичними характеристиками вибору – двигуна, перетворювача, редуктора або електроприводу в цілому – служить номінальний ККД

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_n}, \quad (1.7)$$

де - P_n , P_n – номінальна вихідна потужність і номінальні втрати і залежність ККД від відносного навантаження $\eta = f(P/P_n)$;

У випадках, коли в лінії, що живить електропривод, напруга і струм не збігаються по фазі і мають несинусоїдальну форму, використовується ще одна енергетична характеристика – коефіцієнт потужності, визначуваний як

$$\chi = \frac{P}{UI} = \nu \cos \varphi_{(1)}, \quad (1.8)$$

де P – активна потужність;

$U, I, I(1)$ – значення напруги, струму, першої гармоніки струму, що діють;

$\varphi_{(1)}$ – кут зрушення між першими гармоніками напруги і струму.

При передачі по лінії з деяким активним опором $R_{\text{л}}$ активної потужності P при $\cos \varphi \neq 1$ втрати P_{\sim} виростуть порівняно з втратами при передачі тій же потужності постійним струмом $P_{=}$ у відношенні

$$\frac{\Delta P_{\sim}}{\Delta P_{=}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi}. \quad (1.9)$$

Оцінки енергетичної ефективності електроприводу справедливі, як наголошувалося, лише, якщо процес незмінний в часі. Якщо ж навантаження помітно міняється в часі, слід користуватися оцінками, визначуваними по енергіях за час t :

$$W = \int_0^t P(t) dt \quad (1.10)$$

і

$$\Delta W = \int_0^t \Delta P(t) dt. \quad (1.11)$$

Для циклічних процесів з однонаправленим потоком енергії і часом циклу $t_{\text{ц}}$ зручним і інформативним показником служить цикловий ККД, визначуваний як

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{W_{\text{ц}}}{W_{\text{ц}} + \Delta W_{\text{ц}}} = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt}{\int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt + \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt}, \quad (1.12)$$

де $W_{\text{ц}}$ і $\Delta W_{\text{ц}}$ – корисна енергія і втрати енергії за цикл.

1.2.1 Втрати в сталих режимах

Втрати в електричних машинах детально вивчаються у відповідних курсах. Основні складові втрат в машині:

- втрати в обмотках (втрати в міді)
- втрати в магнітопроводі (втрати в сталі)
- втрати в частинах, що труться (втрати механічні).

Для нерегульованого електроприводу першу складову, пропорційну I^2 , відносять до змінних втрат, оскільки $I \equiv M$, а останній визначається моментом опору, тобто залежить від технологічного процесу. Дві інші складові відносять умовно до постійних втрат, оскільки втрати в магнітопроводі визначаються практично незмінною амплітудою і частотою магнітної індукції, а механічні втрати – практично незмінною швидкістю. Таким чином, для нерегульованого електроприводу в першому наближенні можна вважати

$$\Delta P = D_0 + I^2 R \quad (1.13)$$

де D_0 – постійні втрати

I і R – струм і опір у силовому колі.

У прийнятих моделях електроприводу для зручності передбачалося, що момент на валу дорівнює моменту електромагнітному, а момент, пов'язаний з втратами M , віднесений до моменту опору M_c . Це допущення, що істотно спрощує всі етапи аналізу і синтезу електроприводу, не вносить відчутних погрешностей до результатів в переважній більшості випадків, оскільки самі втрати порівняно невеликі. Зрозуміло, в окремих спеціальних випадках, коли або втрати значні, або їх акуратний облік представляє яке-небудь самостійне завдання, потрібно користуватися повнішими і точнішими моделями.

Загальне уявлення про енергетичну ефективність нерегульованого електроприводу дає залежність ККД двигуна з редуктором від відносного навантаження. На рис. 1.3 для орієнтування приведена така залежність для двигунів середньої потужності (15÷150 кВт) з редуктором (ККД більше 0,95).

Необхідно підкреслити, що робота з недовантаженням призводить до помітного зниження ККД, тому невиправдане завищення потужності двигуна «про всяк випадок» – шкідливо. Так само шкідливі організовані цикли, коли холостий хід займає в циклі велике місце.

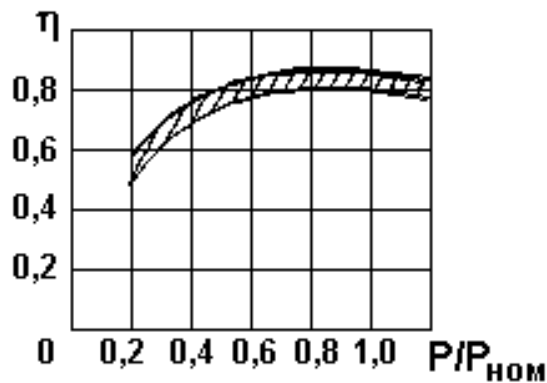


Рис. 1.3 – Типова залежність ККД від навантаження

У регульованому за швидкістю електроприводі енергетична ефективність визначається головним чином вибраним способом регулювання, у зв'язку з чим всі способи можна розділити на дві великі групи залежно від того, змінюється чи ні ω_0 в процесі регулювання.

До першої групи $\omega_0 = \text{const}$ відносяться всі види реостатного регулювання, а також регулювання асинхронного двигуна з к.з. ротором зміною напруги при незмінній частоті. Якщо прийняти для простоти, що $P_{зм} \approx P_1$ і $\Delta P_2 \approx \Delta P_{2м}$, то для цієї групи отримаємо:

$$\Delta P_2 = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = P_1 s, \quad (1.14)$$

тобто втрати в роторному (якірному) колі при будь-якому навантаженні пропорційні різниці швидкостей $\Delta\omega$ ($\omega_0 - \omega$) або ковзанню $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$.

При реостатному регулюванні лише частина цих втрат, пропорційна $\frac{R_{2p}}{R_{2p} + R_{2доб}}$, розсівається усередині машини і гріє її. Інша частина, пропорційна $\frac{R_{2доб}}{R_{2p} + R_{2доб}}$, розсівається поза машиною, погіршуючи, зрозуміло, енергетичні показники електроприводу. Саме ця частина в каскадних схемах використовується корисно.

Складніше і не приємніше співвідношення виявляється в асинхронному електроприводі з короткозамкнутим ротором при регулюванні зміною напруги або яким-небудь ще «цікавим» способом, але при постійній частоті. Тут вся

потужність $\Delta P_2 = P_{1s}$ розсівається в двигуні, нагріваючи його і роблячи спосіб практично непридатним для тривалого режиму роботи.

До другої групи $\omega_0 = var$ відносяться всі «безреостатні» способи регулювання в електроприводах постійного струму – зміною напруги і магнітного потоку і частотне регулювання в електроприводах змінного струму.

Принципово способи другої групи енергетично переважні, оскільки в (1.9) різницю швидкостей $\Delta\omega \approx const$, проте слід враховувати, що в пристроях, що забезпечують $\omega_0 = var$, теж є втрати і при малих потужностях, невеликих діапазонах регулювання і чималій вартості пристроїв необхідні детальні зіставлення.

1.2.2 Втрати в перехідних режимах

Перехідні процеси при швидких змінах впливаючого фактору можуть супроводитися великими кидками моменту і струму, тобто значними втратами енергії. Поставимо завдання оцінити величину втрат енергії в перехідних процесах і знайти зв'язки між втратами і параметрами електроприводу. Враховуватимемо тільки втрати в активних опорах силових кіл двигуна, оскільки саме ця складова загальних втрат помітно зростає в перехідних процесах.

Аналіз проведемо лише для перехідних процесів, віднесених раніше до перших двох груп і почнемо з важливого окремого випадку, коли чинник, що викликає перехідний процес, змінюється миттєво, а процес протікає відповідно до статичних характеристик.

Втрати енергії в колі ротора або якоря за час перехідного процесу t_{nn} визначаються з як

$$\Delta W_2 = \int_0^{t_{nn}} (M\omega_0 - M\omega) dt = \int_0^{t_{nn}} M\omega_0 s dt. \quad (1.15)$$

Для перехідного процесу вхолосту ($M_c = 0$) матимемо:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (1.16)$$

$$\Delta W_{20} = \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} -J\omega_0^2 s ds = J\omega_0^2 \int_{s_{кон}}^{s_{нач}} s ds.$$

Після інтеграції отримаємо остаточно

$$\Delta W_{20} = \frac{J\omega_0^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2). \quad (1.17)$$

Цей результат універсальний, дуже простий і дуже важливий: втрати енергії в якірному або роторному колі за перехідний процес вхолосту ($M_c = 0$) при «миттєвій» появі нової характеристики залежать тільки від запасу кінетичної енергії в роторі при 0 і від початкового і кінцевого ковзань. При пуску і динамічному гальмуванні вони складуть $J\omega_0^2 / 2$, при гальмуванні противоввімкненням $3J\omega_0^2 / 2$, при реверсі $4J\omega_0^2 / 2 = 2J\omega_0^2$. Ні форма механічної характеристики, ні час перехідного процесу, ні які-небудь параметри двигуна, окрім J і ω_0 , не впливають на втрати в роторі.

Якщо в асинхронному двигуні нехтувати струмом намагнічення і вважати, що $I_1 = I_2'$, те $\Delta P_1 = I_1^2 R_1 = \Delta P_2 \frac{R_1}{R_2'}$. Тоді $\Delta W_{10} = \Delta W_{20} \frac{R_1}{R_2'}$, а загальні втрати енергії в асинхронному двигуні за цих умов складуть

$$\Delta W_0 = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) (s_{нач}^2 - s_{кон}^2). \quad (1.18)$$

Перехідний процес – дуже напружений в енергетичному відношенні режим: втрати енергії в десятки разів вищі, ніж за той же час в сталому режимі.

При гальмуванні навантаження знижуватиме втрати:

$$\Delta W_m = \Delta W_0 \frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_c}. \quad (1.19)$$

З викладеного виходять можливі способи зниження втрат енергії в перехідних процесах:

- зменшення моменту інерції за рахунок вибору відповідного двигуна і редуктора або за рахунок заміни одного двигуна двома половинній потужності;
- заміни гальмування противоввімкненням динамічним гальмуванням або використання механічного гальма;

- перехід від стрибкоподібної зміни ω_0 до ступінчастого; при подвоєнні числа ступенів удвічі скорочуватиметься площа трикутників, що виражають втрати енергії;
- плавна зміна ω_0 в перехідному процесі.

Розглянемо докладніше останній спосіб, що реалізовується практично в системах керувань перетворювач – двигун.

При плавній зміні ω_0 в перехідному процесі повинні зменшуватися втрати енергії. Це ілюструється на рис. 1.4, де порівнюються два випадки – прямий пуск вхолосту (а) і частотний пуск вхолосту за час $t_1 \gg T_m$, тобто при прискоренні $\varepsilon = \frac{\omega_{01}}{t_1}$ (б) – заштриховані площі.

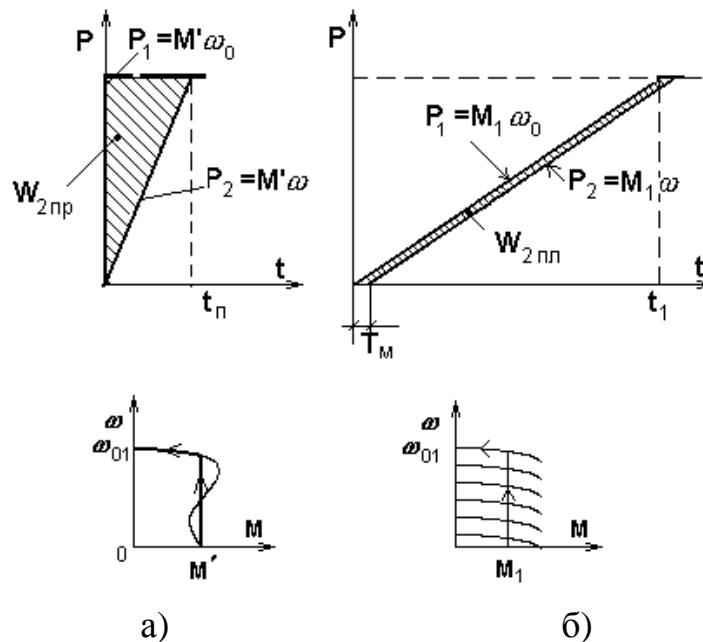


Рис. 1.4 – Втрати при прямому (а) і плавному (б) пуску

При прямому пуску, як вже наголошувалося, втрати енергії в якірному або роторному колі визначається площею заштрихованого трикутника і складуть

$$\Delta W_{2np} = \frac{J\omega_{01}^2}{2}. \quad (1.20)$$

З викладеного виходить, що зменшуючи перехідного процесу і знижуючи момент, можна управляти втратами енергії, знижуючи їх до будь-якої необхідної величини.

1.3 Пуск і гальмування тролейбуса

1.3.1 Пуск тролейбуса

Під дією обертаючого моменту тягового електродвигуна ТЕД до коліс провідного моста (рис. 1.5) прикладається момент M , що викликає пару сил, прикладених в точках 0 і а. Ці сили викликають обертання колеса. Але для руху тролейбуса вперед або назад одного обертання коліс недостатньо. Для отримання кочення коліс необхідна ще дія іншої сили, якою є зчеплення коліс з дорожнім покриттям.

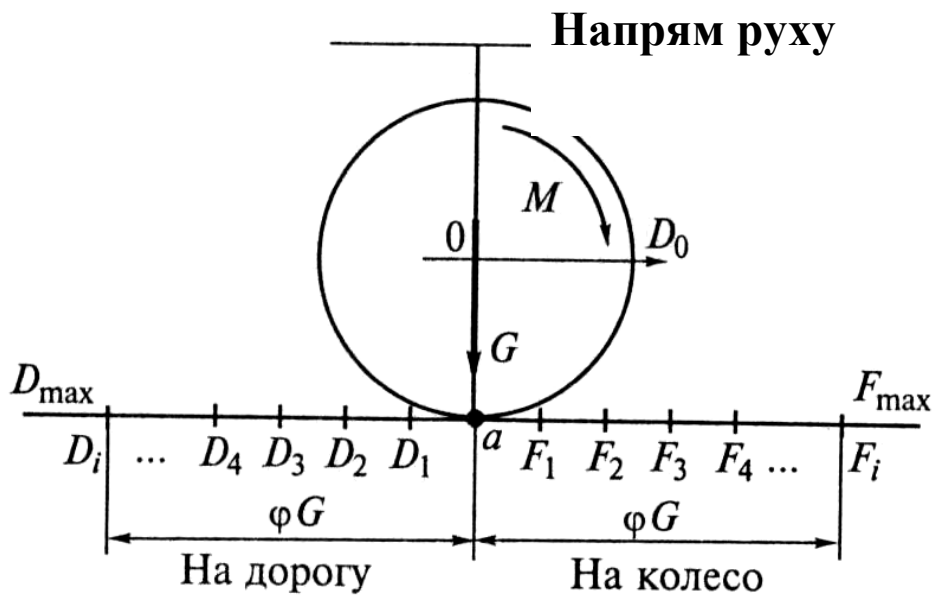


Рис. 1.5 – Реалізація сили тяги при пуску тролейбуса

M — момент, прикладений до колеса від тягового електродвигуна (ТЕД); G — навантаження від колеса на дорогу; $F_1..F_i$ — горизонтальна реакція дороги; $D_1...D_i$ — сила, прикладена до дорожнього покриття; F_{max} , — максимальна горизонтальна реакція дороги; D_{max} — максимальна сила, прикладена до дорожнього покриття; D_0 — елементарна сила, яка визначається моментом, що доводиться від ТЕД на колесо; а — точка зіткнення колеса з дорогою; ϕ — коефіцієнт зчеплення колеса з дорогою.

Зчепленням називають опір зрушенню контактної поверхні колеса щодо поверхні дорожнього покриття, до якого колеса притиснуті вертикальною силою від навантаження, що доводиться на провідне колесо. Ця сила позначена на рис. 1.5 буквою G . При зрушенні поверхні колеса щодо поверхні дорожнього покриття тертя кочення переходить в тертя ковзання. Для пояснення цього процесу уявимо, що колеса провідного моста підняті над дорожнім покриттям, і

електродвигун пущений в хід. При цьому колеса обертатимуться навколо своїх осей, що, проте, не викликає повздовжнього переміщення тролейбуса.

Колеса для створення можливості повздовжнього переміщення повинні мати упор, від якого вони могли б відштовхуватися. Таким упором служить дорожнє покриття, а відштовхуючою зовнішньою силою є діюча на шину горизонтальна реакція дороги $F_1 \dots F_i$. Очевидно, що величина горизонтальної реакції (упору) міняється разом із зміною сили D , що викликає цю реакцію.

При збільшенні сили тяги, наприклад при розгоні тролейбуса, одночасно збільшується сила, прикладена від колеса до дорожнього покриття D_1 і взагалі D_i , крім того збільшується рівна їй горизонтальна реакція F_1 і F_i прикладена від дорожнього покриття до колеса. Якщо сила F_i не перевищить деякої граничної величини, то крапка a , дотична з дорогою, виявиться як би нерухомою (миттєвим центром обертання), унаслідок чого навколо неї під дією обертаючого моменту почне повертатися вся решта точок колеса.

Горизонтальна реакція дорожнього покриття може збільшуватися лише до величини, що не перевищує сили зчеплення колеса з дорожнім покриттям, а саме:

$$F_{\max} = D_{\max} = \varphi G, \quad (1.21)$$

де G — навантаження від колеса на дорогу;

φ — коефіцієнт зчеплення, по величині приблизно рівний коефіцієнту тертя ковзання колеса по дорожньому покриттю при швидкості, близькій до нуля.

Поки сила тяги (дотична) F_K рівна або менше сили зчеплення колеса з дорожнім покриттям, тобто $F_K \leq \varphi G$, колесо має необхідний упор, і відбувається нормальне кочення його уздовж дороги, а рух тролейбуса відбувається без ковзання коліс по дорожньому покриттю.

Як тільки сила F_K перевищить силу зчеплення коліс з дорожнім покриттям, тобто $F_K > \varphi G$, зчеплення коліс з дорожнім покриттям порушиться, унаслідок чого колесо, не маючи достатнього упору, вже не котитиметься по дорозі, а почне ковзати по ній і навіть прискорювати обертання навколо своєї осі. Відбудеться так зване буксування колеса.

Для усунення буксування необхідно або зменшити силу тяги (регулюванням роботи двигуна), або якимсь способом збільшити (відновити) зчеплення коліс з дорожнім покриттям.

З вищесказаного виходить, що сила тяги не може бути більше сили зчеплення коліс провідного моста з дорожнім покриттям, тобто сила тяги не може бути більше деякої частки зчіпної ваги, що доводиться на провідний міст.

1.3.2 Резистори

Резистори на тролейбусі призначені для обмеження струму в електричних колах. По своєму призначенню резистори підрозділяють на: пускові, гальмові, регулювальні, додаткові, розрядні, демпферні й ін.

Пускові резистори включаються в ланцюг якоря ТЕД для зменшення пускового струму.

У гальмових резисторах розсіюється електроенергія, вироблювана ТЕД при реостатному електродинамічному гальмуванні. Часто в електричних схемах ті самі резистори використовуються як при розгоні, так і в гальмовому режимі.

Регулювальні резистори призначені для регулювання магнітного поля в паралельній і послідовній обмотках збудження ТЕД.

Розрядний резистор зменшує перенапруги в паралельній обмотці збудження ТЕД, що виникають при розмиканні ланцюгів.

Демпферні резистори служать для обмеження струму в ланцюгах електродвигунів привода компресора й вентилятора.

У гальмових резисторах розсіюється електроенергія, вироблювана ТЕД при реостатному електродинамічному гальмуванні. Часто в електричних схемах ті самі резистори використовуються як при розгоні, так і в гальмовому режимі.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики тягового електродвигуна тролейбуса 3iY

Параметри	3iY-682Y
	ДК-210А3
Напруга номінальна, В	550
Потужність номінальна, кВт	110
Частота обертання максимальна, об/хв	3900
Частота обертання номінальна, об/хв	1500
Струм годинного режиму, А	220
Струм тривалого режиму, А	185
Розміри щіток, мм	16x33x50
Мінімально припустима висота щітки, мм	20,0
Марка щітки	ЕГ-2А
Маса ТЕД, кг	725

Регулювальні резистори призначені для регулювання магнітного поля в паралельній і послідовній обмотках збудження ТЕД.

Розрядний резистор зменшує перенапруги в паралельній обмотці збудження ТЕД, що виникають при розмиканні ланцюгів.

Демпферні резистори служать для обмеження струму в ланцюгах електродвигунів привода компресора й вентилятора.

Додаткові резистори типу ПЕ включаються в ланцюзі котушок реле, ламп, низьковольтних електродвигунів і т.п.

Резистори монтуються в ящиках або на панелях; розрізняються вони по конструкції й по потужності.

Резистори типу КФ випускаються довжиною 520 і 600мм, потужністю 1820 і 2150 Вт відповідно. У межах однієї довжини резистори мають різний опір і розраховані на різний тривалий струм.

У якості демпферних, регулювальних і розрядних резисторів застосовують опору типу СР потужністю 200Вт. Порцеляновий циліндр (ізолятор) має на своїй поверхні гвинтову канавку, куди укладається дріт з фехралю. Резистор типу СР може мати проміжний вивід.

1.3.3 Контролери

На тролейбусах ЗіУ встановлені два контролери: контролер керування й груповий реостатний контролер.

Контролер керування задає режим роботи контакторам і груповому реостатному контролеру і являє собою електричний груповий апарат кулачкового типу з педальним керуванням. Він складається з рами, на якій закріплені: контролер ходу, реверсор, гальмовий контролер і механічне блокування.

Контролер ходу призначений для керування пуском тролейбуса й містить у собі кулачковий барабан, що складається зі сталевого вала квадратного перетину й ізоляційних кулачкових шайб, кулачкових елементів і педального привода.

Гальмовий контролер задає гальмовий режим. Він складається з гальмового барабана з укріпленими на ньому кулачками з ізоляційного матеріалу й кулачкових елементів. У контролерах ходу й гальмування застосовують кулачкові елементи типу КЭ-42. Гальмовий барабан обертається

на циліндричній частині вала контролера ходу й приводиться в дію гальмовою педаллю, пов'язаної з важелем.

До пластмасової рейки каркаса кріпляться чотири тримачі контактних пальців шунтами з мідної стрічки й притискних пружин. Реверсивний барабан має три фіксованих позиції: «Уперед», «ПРО», «Назад».

1.3.4 Автоматичні вмикачі, вимикачі й запобіжники

Автоматичні вимикачі призначені для автоматичного відключення ТЕД від контактної мережі при перевантаженні або короткому замиканні у високовольтних ланцюгах тролейбуса. На тролейбусах сімейства ЗіУ встановлений автоматичний вимикач АВ-8А-1.

Пристрій автоматичного вимикача наведене на рис. 1.6. Механізм вимикача змонтований на панелі з асбоцементу й укладений у пластмасовий корпус 3. Нерухливий контакт 6 укріплений болтом на затискачі 2, до якого приєднаний один із зовнішніх проводів. Рухливий контакт 7 болтом укріплений на рухливому тримачі 5, що віссю 4 з'єднаний з важелем тримача 23. Всі деталі рухливого механізму (важіль тримача 23 рухливого контакту, важіль ручного привода 27, засувка 22 із пружиною й що відключає притираючи пружини 1, укріплені на рамі контактного механізму 25. Рухливий контакт гнучким мідним шунтом 12 з'єднаний з максимальною котушкою 14 і дугогасильним рогами 11.

Максимальна котушка автоматичного вимикача одночасно є дугогасильною. Вона виконана із шинної міді, намотаної на ребро. Другий кінець котушки виведений на затискач 16, до якого приєднаний друге зовнішнє проведення. При включенні автоматичного вимикача струм іде від затискача 2 через нерухливий 6 і рухливий 7 контакти, гнучкий шунт 12, максимальну котушку 14 і затискач 16. У випадку проходження надмірного струму магнітний потік котушки, переборюючи натяг регулювальної пружини, притягає якір до сердечника. При цьому жавий 17 якоря 15 виводить засувку 22 із зачеплення, контакти під дією пружини, що відключає, розмикаються й розривають ланцюг ТЕД.

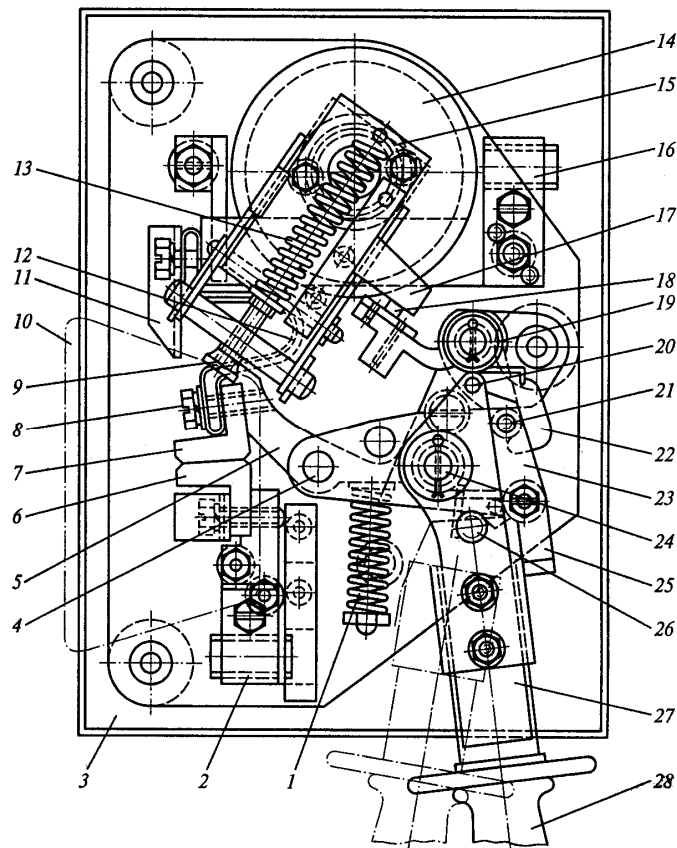


Рис. 1.6 – Автоматичний вимикач АВ-8А-1:

*1 — що відключає (притираюча) пружина; 2, 16— затискачі;
3 — пластмасовий корпус; 4 — вісь; 5 — рухливий тримач; 6 — нерухливий контакт; 7 — рухливий контакт; 8 — болт; 9 — регульовальна гайка;
10 — дугогасильна камера; 11 — дугогасильний ріг; 12— гнучкий шунт;
13 — регульовальна пружина; 14 — максимальна котушка; 15 - яркір;
17— бойок; 18— хвостовик засувки; 19 — пружина засувки; 20— виступ важеля;
21 — валик; 22 — засувка; 23 — важіль тримача; 24 — вісь важеля ручного привода; 25 — рама контактного механізму; 26— шпилька важеля ручного привода; 27 — важіль ручного привода; 28 ізоляційна рукоятка*

Електрична дуга, що виникає між контактами в момент їхнього розмикання, викидається під дією дугогасильної котушки в дугогасильну камеру 10 і гасне в ній.

Установлено автоматичні вимикачі на перегородці кабіни водія тролейбуса.

Для включення й відключення електродвигуна вентилятора й генератора, електродвигуна компресора, паралельної обмотки збудження ТЕД (на тролейбусах ЗіУ-682У), а також ланцюгів опалення приміщення для пасажирів і кабіни водія використовуються вимикачі ВУ 22-2Б1.

Технічні дані автоматичних вимикачів наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. – Технічні дані автоматичного вимикача АВ-8А-1

Параметри	АВ-8А-1
Напруга, В	550
Струм, А тривалий номінальний	240 185
Межі спрацьовування, А	360.....1000
Розчин контактів, мм	14,5...15...15
Провал контактів, мм	9±1
Контактне натискання початкове, кгс	3,0...5...5,4
Контактне натискання кінцеве, кгс	9,0...14...14,0
Повний час відключення, з	0,05
Маса, кг	8,2
Величина уставки, А	500 (650)

Вимикач ВУ 22-2Б1 складається з підстави й кришки з карболіту, рухливого й нерухливого контактів і дугогасильного пристрою. При експлуатації рекомендується не затримувати рух рукоятки під час відключення апарата. Необхідно також стежити за рухливим контактом, не допускаючи торкання його об стінки дугогасильної камери. Вимикачі ВУ 22-2Б1 установлені в кабіні водія з лівої сторони.

Для захисту електричних допоміжних кіл 550, 24 і 12В застосовуються плавкі запобіжники.

Трубчастий запобіжник на напругу 550В. Його вставка виготовлена з мідної смужки або дроту, упаяної в латунні ковпачки. Ці ковпачки укріплені по обидва боки фібрової трубки гвинтами. Вставка розташована усередині фібрової трубки, вільний простір якої заповнено засипанням (мармуровою крихтою або чистим річковим піском).

При установці плавкого запобіжника його латунні ковпачки входять у пружинні затискачі. Номінальний струм спрацьовування, на який розрахований плавкий запобіжник, зазначений на ковпачку. При перегорянні плавкої вставки усередині фібрової трубки значно підвищується тиск газів, виділених фіброю й мармуровою крихтою, що сприяє швидкому гасінню виникаючої електричної дуги. Крім того, при зіткненні із зернами засипання відбувається швидке охолодження дуги. Запобіжники електричних кіл на 550В тролейбусів ЗіУ поміщені в ізоляційні піни, кришки яких кріпляться до

корпуса за допомогою засікши. Розташовуються ці піни за спинкою крісла водія на перегородці кабіни.

Запобіжники на 12 і 24В тролейбусів ЗіУ встановлені на панелі, розташованій між приладовим щитком водія й контакторною панеллю. На різних тролейбусах кількість і характеристики запобіжників різні й залежать від прийнятих електричних високовольтних і низьковольтних електричних схем.

Основними несправностями, які зустрічаються в експлуатації автоматичного вимикача, є обгар клеми шунта, автоматичне відключення вимикача при пуску. Причинами в цих випадках відповідно можуть бути слабе кріплення шунта, зношування гачка засувки або коловий вогонь на колекторі ТЕД.

При ТЕ-1 перевіряють вручну роботу автоматичного вимикача. Рукоятка автомата повинна фіксуватися в положеннях «Включене» і «Виключене». Перевіряють кріплення контактів, шунта й самого автомата, зачищають контакти й іскрогасильну камеру.

При ТЕ-2 додатково оглядають і кріплять всі інші деталі й вузли автомата, перевіряють і доводять до норми тиск, розчин і провал контактів.

1.3.5 Заходи безпеки

Наявність електроустаткування, що працює під відносно високою напругою контактної мережі, яка необхідна для роботи тягового приводу і інших споживачів тролейбуса, вимагає строгого дотримання правил електробезпеки. Порухення правил безпечної праці може привести до поразки електричним струмом з найважчими наслідками. Тому необхідно слідувати наступним головним правилам:

- не виробляти які-небудь роботи з електроустаткуванням як відкритими руками, так і за допомогою інструменту або будь-яких підручних предметів при встановлених на контактні дроти струмоприймача. Це відноситься не тільки високовольтного електроустаткування напругою 550В, але і електроустаткування бортової мережі напругою 24В;

- не допускати струми витоку більш 3мА. Струм витоку слід контролювати або по бортовому пристрою (при його наявності), або періодично на кінцевих станціях і в депо при щоденному технічному обслуговуванні;

- не допускати використання в електричних колах високої і низької напруги кустарно виготовлених плавких запобіжників;

- виконувати прибиральні роботи з використанням води під тиском в приміщенні для пасажирів і кабіні водія при встановлених на контактні дроти струмоприймачах;

- при виконанні мийних робіт не допускати попадання води на електроустаткування, розташоване під підлогою тролейбуса;
- не опускати струмоприймачі або встановлювати їх штангоуловлювачем на дрти контактної мережі при включеному блоці управління;
- не виробляти будь-які роботи під тролейбусом, який не поставлений на козла, не піднятий домкратами або не знаходиться над оглядовою канавою;
- не виробляти запуск тягового електродвигуна, якщо під тролейбусом знаходяться люди;
- не виробляти демонтаж будь-якого з вузлів пневматичної системи тролейбуса або ослаблення з'єднань за наявності тиску повітря в резервуарах;
- не залишати тролейбус на ухилі, якщо він не загальмований гальмом стоянки;
- не залишати тролейбус на довгий час з підключеним до контактної мережі електроустаткуванням;
- не виробляти зварювальні роботи на тролейбусі без індивідуального відключення люмінесцентних світильників, блоку тиристорно-імпульсної системи управління тяговим електродвигуном, перетворювача і блоку управління штангоуловлювачами;
- не накачувати шини без спеціальної огорожі (кліті), переконавшись, що замочне кільце повністю лягло в замковий паз диска.

При технічному обслуговуванні акумуляторних батарей необхідно дотримувати заходи безпеки:

- зарядку виробляти в спеціальному приміщенні;
- слід захищати шкіру і очі від попадання лугу. При попаданні електроліту на шкіру її промивають водою, потім 5%-ним розчином борної кислоти і знову водою. При попаданні електроліту в очі необхідно ретельно промити їх водою і негайно звернутися до лікаря.

При виконанні ремонтних робіт на лінії необхідно виконувати запобіжні наступні основні засоби:

- не працювати під тролейбусом, який знаходиться на похилій площині. У разі потреби слід загальмувати тролейбус і встановити під колеса противіткатні упори;
- не працювати і не знаходитися під тролейбусом, якщо він стоїть на домкратах без страхуючих підставок;
- влізати під тролейбус і вилазити з-під нього тільки із сторони, протилежної проїзду.

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

2.1 Електричне гальмування

Електричне гальмування засноване на принципі оборотності ТЕД у генератори.

Електрична енергія, вироблена генераторами при гальмуванні, виходить за рахунок кінетичної енергії, запасеної в рухливому составі при його розгоні, або за рахунок потенційної енергії при підгальмовуванні на спусках.

Електричне гальмування називається реостатним, якщо електроенергія генераторів гаситься в резисторах, або рекуперативним, якщо енергія передається в контактну мережу.

На всіх видах сучасного рухливого состава міського транспорту застосовують електричне гальмування, тому що воно дозволяє підвищити надійність й істотно знизити експлуатаційні витрати на зміну гальмових колодок і ремонт гальмової системи. Колеса рухливого состава, обладнаного електричним гальмуванням, менш піддані юзу; застосування електричного гальмування підвищує безпека руху, тому що наявність на рухливому составі другого виду гальма – механічного – забезпечує резервування процесу гальмування, що завжди зберігається як додаткове й екстрене.

Найбільше поширення одержало реостатне гальмування. На рухливому составі з ТЕД змішаного збудження застосовують обидва види гальмування – рекуперативне й реостатне.

Рекуперативне гальмування використовують, головним чином, як засіб зниження швидкості й для підгальмовування на спусках; керування рекуперативним гальмуванням при цьому здійснюється переміщенням вала контролера керування з позицій високої на позиції низької швидкості. При гальмуванні до зупинки звичайно використовують тільки реостатне гальмування.

Система електричного гальмування повинна задовольняти наступним основним вимогам:

- мати електричну стійкість при всіх можливих експлуатаційних режимах, тобто при будь-яких перехідних процесах, викликаних короточасними відхиленнями, система повинна досягати стану рівноваги (сталого режиму) з досить швидким загасанням перехідного процесу;

- допускати можливо менші відхилення струмів паралельно включених ланцюгів двигунів при різних діаметрах ведучих коліс і характеристиках двигунів;
- забезпечувати плавну й швидку появу гальмової сили при установці контролера керування в положення гальмування;
- забезпечувати необхідні гальмові характеристики;
- забезпечувати зручне й просте в експлуатації керування гальмовим процесом при мінімумі додаткового електроустаткування;
- мати високу експлуатаційну надійність і стійкість по комутаційних, теплових й ізоляційних властивостях тягових двигунів, а також допоміжних електричних машин й апаратів;
- бути досить простою й істотно не здорожувати вартість електричного рухливого состава.

Принципи перевірки електричної стійкості схем гальмування розглянемо на найпростішому прикладі.

На рис. 2.1, а показана схема й характеристики при роботі одного двигуна послідовного збудження в режимі реостатного гальмування. У цій схемі для забезпечення самозбудження кінці обмотки збудження або якорі повинні бути переключені (реверсировані). Крива 1 є внутрішньою характеристикою $[E(I_T)]$ генератора при постійній швидкості ($v_T = \text{const}$), а пряма 2 — залежністю спадання напруги $[I_T(R_T + r_{дв})]$ на гальмовому опорі й в обмотках двигуна (генератора).

Перетинання цих характеристик у крапці а є крапкою рівноваги: $E = I_{Ta}(R_T + r_{дв})$. При будь-якому відхиленні струму від положення рівноваги виникає ЕРС самоіндукції $L(dI_T/dt)$. Тоді в перехідному режимі ЕРС обертання

$$E = I_T(R_T + r_{ов}) + L(dI_T / dt), \quad (2.1)$$

Де R_T — гальмовий опір;

L — індуктивність всього кола.

Допустимо, що з якоїсь причини струм збільшився до значення $I_T > I_{Ta}$; при цьому $E < I_{T1}(R_T + r_{дв})$. Отже, з рівняння (2.1) $L(dI_T/dt) < 0$.

Така ЕРС самоіндукції може бути викликана тільки дією убутного струму $(dI_T/dt) < 0$. Тому після усунення причини, що викликала відхилення, струм

зменшиться й рівновага відновиться. Допустимо, що струм зменшився до $I_{T2} < I_{Ta}$, тоді $E > I_{T2}(R_T + r_{дв})$ і $L(dI_T/dt) < 0$. Ця ЕДС самоіндукції створюється дією зростаючого струму й рівновага відновлюється. Отже, крапка а відповідає режиму стійкої рівноваги й схема є електрично стійкою.

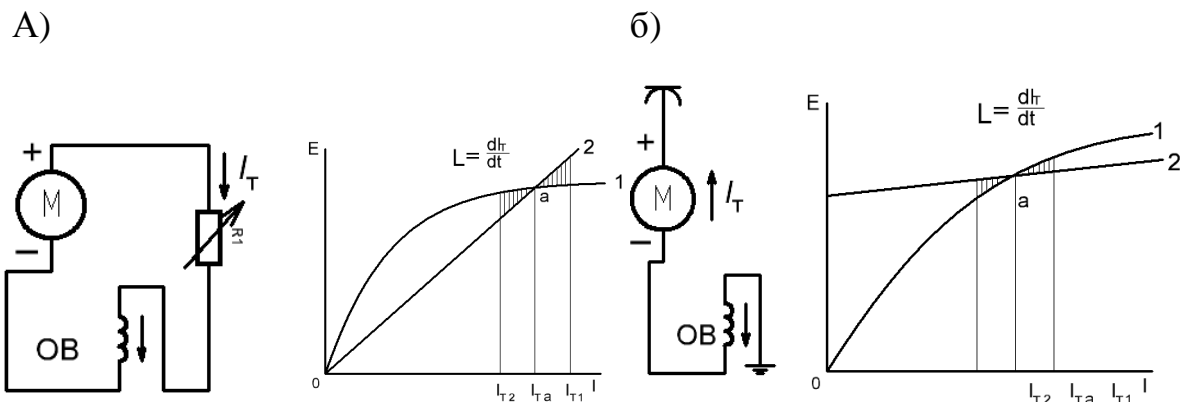


Рис. 2.1 – Схеми й характеристики електродвигуна послідовного збудження

У розглянутому випадку нахил внутрішньої характеристики генератора в крапці рівноваги менше нахилу прямій зовнішньої напруги:

$$(dE / dI_T) r_T = r_{TA} < d[I_T (R_T + r_{дв})] / dI_T. \quad (2.2)$$

На рис. 2.1, б показані схеми й характеристики (1 — внутрішня $E(I_T)$ і 2 — зовнішня $U_n + I_T r_{дв}$) ТЕД послідовні порушення при роботі його в режимі генератора паралельно з мережею, тобто при рекуперативному гальмуванні. Якщо припустити, що мережа має необмежену потужність, то напруга мережі не змінюється при підвищенні її навантаження й рівняння перехідного процесу буде мати такий вигляд:

$$E = U_{II} + I_T r_{дв} + L(dI_T / dt). \quad (2.3)$$

Припустимо, що струм збільшився $I_{T1} > I_{Ta}$, тоді $E > U_{II} + I_T r_{дв}$ й $L(dI_T/dt) < 0$, що відповідає подальшому зростанню струму. При $I_{T2} < I_{Ta}$ ЕРС $E < U_{II} + I_{T2} r_{дв}$ й $L(dI_T/dt) < 0$, що відповідає подальшому зменшенню струму. Таким чином, ця схема електрично нестійка, тобто непрацездатна. У цьому випадку

$$(dE / dI_T) r_T = r_{TA} > (U_{II} + I_T r_{дв}) / dI_T. \quad (2.4)$$

На підставі розглянутих прикладів і нерівностей (2.2) і (2.4) можна записати загальна ознака електричної стійкості нерозгалужених схем в виді нерівності

$$dU / dI_T < dU_{BH} / dI_T, \quad (2.5)$$

де U — напруга генераторів;

U_{BH} — напруга зовнішнього кола.

Нерівність (2.5) статичної стійкості для розгалужених схем необхідно, але не досить.

2.2 Реостатне гальмування при послідовному збудженні тягових двигунів

Реостатне гальмування з генератором послідовного порушення одержало широке поширення. На електричному рухливому составі міського транспорту його застосовують на вагонах метрополітену й на багатьох типах трамвайних вагонів.

Основною перевагою цього виду гальмування є те, що воно здійснюється без додаткового джерела енергії для ланцюга порушення. Крім того, режим гальмування не залежить від напруги в контактній мережі.

Істотний недолік такого гальмування полягає в значній тривалості й нестабільності процесу самозбудження генераторів.

2.2.1 Процес самозбудження

Час самозбудження генератора можна визначити шляхом інтегрування (2.1) стосовно до схеми (див. рис. 2.1):

$$t = \int_0^{I_{TA}} \{L_{\partial\partial} / [E - I_T (R_T + r_{\partial\partial})]\} dI_T. \quad (2.6)$$

Залежності $L_{дв}(I_T)$ і $E(I_T)$ нелінійні і їхні потрібно виразити у формі, зручної для інтегрування. Звичайно ці залежності будують графічно, використовуючи навантажувальні характеристики двигуна і його параметри. Тому інтегрування рівняння (2.6) зручно виконати графоаналітичним методом.

При самозбудженні генератора, особливо в початковій стадії, швидкість рухливого состава змінюється повільно. Тому процес самозбудження можна розглядати при $v=\text{const}$. Передбачається також, що при самозбудженні генераторів гальмовий опір $R_T=\text{const}$. У цьому випадку ЕРС самоіндукції $E_s(I_T)$ можна побудувати по різниці ординат внутрішньої характеристики генератора й зовнішньої характеристики навантаження-прямий $I_T(R_T+r_{дв})$: $E_s=L_{дв}(dI_T/dt)=E-I_T(R_T+r_{дв})$.

По кривих $L_{дв}(I_T)$ і $E_s(I_T)$ будують їхнє відношення. Інтеграл цієї залежності визначають по площі, обмеженої кривій $(L_{дв}/E_s)$ (I_T) і віссю абсцис у межах від $I_T=0$ до $I_{та}$. Криву $t(I_T)$ будують шляхом послідовного підсумовування елементарних площадок:

$$t = \sum \Delta t = \sum (L_{дв} / E_s)_{cp} \Delta I, \quad (2.7)$$

де $(L_{дв}/E_s)_{cp}$ — середня в інтервалі струму Δt ордината кривій $(L_{дв}/E_s)$ (I_T).

Час самозбудження залежить від багатьох факторів і може змінюватися в широких межах. При розробці системи керування варто враховувати цю обставину. При неавтоматичному керуванні водій, не відчуючи гальмового ефекту під час самозбудження генераторів, може вивести значно більший гальмовий опір, чим потрібно, що приведе до великого поштовху гальмового струму й гальмової сили. Навпаки, надмірна обережність водія викликає запізнювання процесу гальмування.

Більші труднощі виникають при автоматизації режиму гальмування, тому що за час самозбудження може виключитися значна величина гальмового опору й створити великий поштовх струму й гальмової сили. Затримувати виведення R_T на час самозбудження ТЕД також небажано, тому що це приведе до збільшення $t_{нач}$ і гальмового шляху. На міському ЕПС завдання ускладнюється тим, що весь процес гальмування при більших v триває всього 3-10 із залежно від швидкості на початку гальмування.

Для прискорення й стабілізації процесу самозбудження, головним чином у першій його стадії, можливі різні способи:

1) додаткове порушення за допомогою спеціальної підмагнічувальної обмотки, що має МДС порядку 8-15% від МДС основної обмотки при номінальному режимі;

2) додаткове живлення основної обмотки збудження від акумуляторної батареї або іншого джерела струму;

3) використання реостатного гальмування при невеликому струмі під час вибігу;

4) зменшення гальмового опору або посилення поля на початку процесу самозбудження на короткий час, якщо гальмування починається при ослабленому полі.

На сучасному вітчизняному рухливому составі міського транспорту найпоширенішим є перший спосіб. Третій спосіб застосовують на трамвайних вагонах типу “Татра” і РСС, четвертий спосіб - тільки при тиристорному регулюванні, тому що вимагає досить швидкодіючої й надійної системи відключення ланцюга, що форсує самозбудження генераторів.

Підмагнічування генераторів рівносильне збільшенню залишкової ЕРС, що значно скорочує час першої стадії процесу самозбудження, у результаті чого процес самозбудження генераторів виходить більше стабільним і керування рухливим составом істотно полегшується.

Гальмова сила дорівнює сумі електромагнітної сили й сили від магнітних і механічних втрат у двигуні й зубчастій передачі.

$$B = F_{\text{ЭМ}} + \Delta F = 3,6C\Phi I_T + 3,6(\sum P_{\text{МАГ.М}} / V_T). \quad (2.8)$$

При реостатному гальмуванні із самозбудженням генераторів, так само як при тяговому «режимі, струм збудження дорівнює струму якоря або при ослабленому полі пропорційний йому. Тому характеристики реостатного гальмування можна побудувати по електромеханічних характеристиках тягового режиму. Якщо прийняти, що магнітні й механічні втрати при однаковому струмі гальмового й рухового режимів рівні, те, підставивши значення $F_{\text{ЭМ}} = F + \Delta F$ в (2.8), одержимо

$$B = F + 2\Delta F. \quad (2.9)$$

Значення $\Delta F(I_T)$ можна побудувати як різниця

$$\Delta F = F_{\text{ЭМ}} - F. \quad (2.10)$$

Залежність $F_{\text{ЭМ}}(I_T)$ розраховують за допомогою навантажувальних характеристик.

Залежність швидкості від струму при одному двигуні визначають по рівнянню

$$E = C\Phi V_T = I_T(R_T + r_{\text{ДВ}}). \quad (2.11)$$

Підставивши значення СФ при $R_{\Pi}=0$, одержимо

$$V_T = V_{ДВ} I_T (R_T + r_{ДВ}) / (U_{ДВ} - I_T r_{ДВ}), \quad (2.12)$$

де $U_{ДВ}$ і $V_{ДВ}$ — напруга й швидкість двигуна (визначають по швидкісній характеристиці тягового режиму).

По рівнянню (2.12) можна побудувати характеристику $V_T(I_T)$ при різних значеннях R_T .

При гальмуванні із самозбудженням генераторів звичайно використовують пускові опори й пускову електроапаратуру (реостатний контролер, реостатні контактори). Це вимагає ретельного узгодження пускових і гальмових характеристик, що значно зручніше виконати при їхній графічній побудові, що полегшує побудову пробних характеристик.

2.2.2 З'єднання генераторів

При пуску звичайно застосовують перемикання тягових двигунів з послідовного на послідовно-паралельне або паралельне з'єднання. Під час гальмування немає можливості перемикати ТЕД без перерви процесу гальмування. Тому із двох можливих з'єднань генераторів - послідовного або паралельного (послідовно-паралельного) - вибирають одне.

Розглянемо на прикладі рухливого состава із двома тяговими двигунами, що мають номінальну напругу, рівна напрузі в контактній мережі ($U_{ДВ.Н}=U_{\Pi}$), яке із двох можливих з'єднань більш зручно для реостатного гальмування. Прийmemo гальмовий струм рівним пусковому й максимальна напруга на кожному генераторі при гальмуванні $U_{\max}=aU_{\Pi}$, де a — деякий коефіцієнт.

Тоді при послідовному з'єднанні

$$R_{\Pi} \approx U_{\Pi} / I \quad \text{и} \quad R_T \approx 2aU_{\Pi} / I_T, \quad (2.13)$$

де $R_T \approx 2aR_{\Pi}$

Якщо ж генератори з'єднати паралельно, то

$$R_T = aU_{\Pi} / (2I_T) \approx (a/2)R_{\Pi}. \quad (2.14)$$

Для одержання великої гальмової сили при високій швидкості рухливого состава варто прийняти $a \approx 2$. Тому при паралельному з'єднанні двигунів під час

гальмування $R_T \approx R_{\Pi}$ і щабля гальмових опорів можуть бути краще погоджені із щаблями пускових опорів. Іншою перевагою паралельного з'єднання генераторів є менша схильність колісних пар юзу.

У схемі, зображеній на рис. 2.2, не потрібно реверсирувати обмотки збудження при переході з тягового на гальмовий режим. Проходження струму по обмотках двигунів у тяговому режимі показано штриховими стрілками, а в гальмовому режимі - суцільними.

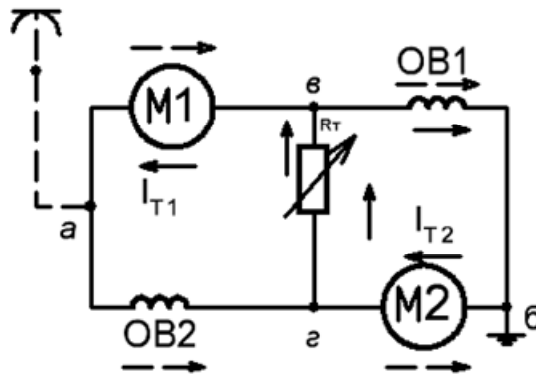


Рис. 2.2. – Схема реостатного гальмування з діагональним включенням R_T

Як видно з малюнка, струм по обмотках збудження протікає в одному напрямку в обох режимах, а в обмотках якорів змінюється на зворотний при переході на генераторний режим. Таким чином, якщо живлення схеми в тяговому режимі робити через крапки а й б, а в гальмовому режимі опір приєднувати до крапок у и г, то реверсування обмоток не буде потрібно. Причому, при гальмуванні струм обмотки якоря першого двигуна протікає по обмотці збудження другого, а струм обмотки якоря другого - по обмотці збудження першого. Таке з'єднання генераторів називають перехресним.

Застосовують також ряд інших схем з роздільними гальмовими опорами, що працюють на різні групи двигунів. У ланцюг хоча б одного з контурів перехресного з'єднання ТЕД ставлять контактор, що розмикає контур. Це потрібно для того, щоб запобігти можливості самозбудження ТЕД при транспортуванні ЕПС. При відсутності розриву в одному з контурів і положенні реверсора, протилежному необхідному по напрямку руху, один з генераторів перемагнічується (якщо, наприклад, $E_2 > E_1$, то — перший). При цьому обидва генератори працюють послідовно на коротке замикання.

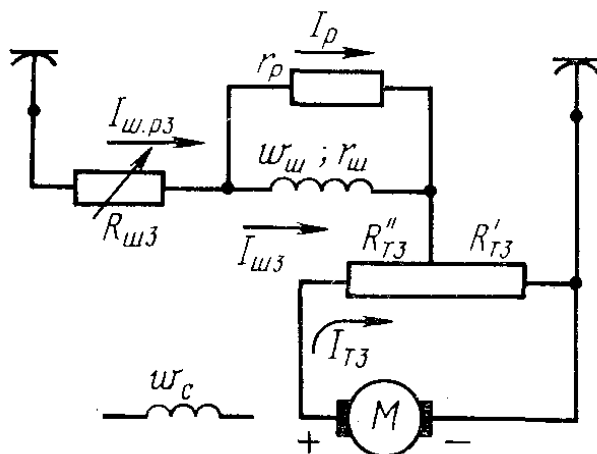


Рис. 2.3 – Схема реостатного гальмування при ввімкненій послідовній обмотці

Більш широке поширення одержала схема реостатного гальмування (рис. 2.3). Ця схема відрізняється тим, що обмотка послідовного порушення відключена при гальмуванні. Тут не потрібно реверсування обмотки якоря, і схема спрощується. Розрахунок гальмових характеристик можна виконати, якщо прийняти $w_c = 0$. Тоді

$$F_B = I_{ш03} w_{ш} - \lambda_3 w_{ш} I_{т3}. \quad (2.15)$$

З порівняння навантажень паралельної обмотки й споживання потужності обмотками збудження видно, що в іншій схемі паралельна обмотка збудження використана менш економічно. Цей недолік особливо сильно проявляється в області більших струмів I_r . У схемі (рис. 2.3) виходить достатнє розвантаження обмотки паралельного порушення при відносно простому способі переходу на гальмовий режим.

Всі три схеми дають можливість використати рекуперативне гальмування для зниження швидкості й гальмування на спусках при спільній дії двох обмоток збудження.

Істотний недолік розглянутих схем реостатного гальмування у випадку їхнього застосування на тролейбусах полягає в тому, що при включеному гальмовому ланцюзі під час стоянки по обмотці паралельного порушення протікає максимальний струм. Такий режим можливий, коли водії під час стоянки використовують механічне гальмування, кероване від загальної педалі з реостатним .

Зниження значення $I_{ш.макс}$ з метою розвантаження обмотки паралельного порушення при збереженні максимального значення гальмової сили можливо тільки при одночасному зменшенні w_c .

У всіх трьох схемах гальмова сила досягає максимуму при певних значеннях гальмового струму I_T . Визначення співвідношень, при яких може бути отримане $V_{\text{макс}}$, необхідно для правильного вибору гальмових характеристик.

2.3 Рекуперативне гальмування

Розглянемо рекуперативне гальмування з генераторами зустрічно – змішаного порушення. Їхньої характеристики задовольняють умовам електричної стійкості (2.5). Для переходу з рухового на генераторний режим необхідно збільшувати струм в обмотці паралельного порушення доти, поки ЕРС машин не перевищить напруги мережі. При цьому напрямок струму в якорі зміниться, а напрямок магнітного потоку залишиться колишнім.

Для регулювання гальмової сили в процесі рекуперативного гальмування використовують такі ж щаблі зміни порушення, які застосовують для ослаблення поля в тяговому режимі, але їх перемикають у зворотному порядку.

Рівняння ланцюга навантаження при рекуперативному гальмуванні розраховуючи на один двигун

$$E = C\Phi V_T = U_{\Pi} + I_T r_{\text{ДВ}}. \quad (2.16)$$

Магніторушійну силу порушення в генераторному режимі визначають, так само як і при реостатному гальмуванні. Швидкісні характеристики рекуперативного гальмування $V_T(I_T)$ являють собою продовження швидкісних характеристик тягового режиму в області генераторних струмів й їх звичайно будують спільно.

Характеристики гальмової сили $B(I_T)$ можуть бути визначені по (2.8); при однакових струмах у паралельній обмотці $I_{\text{ш}}$ вони є загальними для реостатного й рекуперативного гальмування.

При виборі параметрів обмоток збудження $w_{\text{ш}}$ й w_c необхідно враховувати вимоги як тягового режиму, так і режиму рекуперативного гальмування.

На рис. 2.4 показані характеристики $V_T(I)$, $F(I)$ і $B(I_T)$ при трьох різних сполученнях режимів порушення: $I_{\text{ш1}}w_{\text{ш1}} > I_{\text{ш2}}w_{\text{ш2}} > I_{\text{ш3}}w_{\text{ш3}}$ й $w_{c1} < w_{c2} < w_{c3}$.

Як видно з розташування кривих $V_T(I)$, при однаковій силі тяги, швидкості й струмі тягового режиму, наприклад при номінальному режимі (I_q), характеристика 2 має більше значення d/d , ніж характеристика 1.

Пускові властивості двигуна з характеристиками 2 значно краще, ніж з характеристикою 1. Тому що меншій швидкості виходу на автоматичну характеристику V_{π} відповідає більше значення магнітного потоку, то при пуску з однаковим прискоренням пусковий струм менше й V_{π} нижче, що забезпечує зменшення втрат енергії в пускових реостатах. При однакових коливаннях пускового струму буде потрібно менше число пускових щаблів за рахунок більшого значення d/d і меншої V_{π} . Однак в області рекуперативного гальмування вона має недостатню гальмову силу B_{\max} .

Однакове значення B_{\max} може бути досягнуте при характеристиках 1 й 3. Характеристика 3 виходить при менших МДС обмоток збудження, що зменшує поперечні розміри двигуна, його масу й габарити. Крім того, при більшій високій номінальній швидкості виходить менше магнітний потік, що дозволяє зменшити поздовжній розмір або ще зменшити поперечний розмір ТЭД. Однак коли вибирають характеристики рекуперативного гальмування, те варто враховувати величину швидкості V_0 , вище якої ще можливо рекуперативне гальмування. При надмірно високих значеннях V_0 здійснення рекуперативного гальмування на спусках може виявитися неможливим за умовами безпеки, а діапазон швидкості ефективного гальмування до зупинки — недостатнім. За інших рівних умов чим менше V_0 , тим вище економічний ефект рекуперативного гальмування. Крім того, при характеристиці 3 виходить більше висока швидкість виходу на автоматичну характеристику при пуску, що пов'язане зі збільшенням втрат у пускових реостатах.

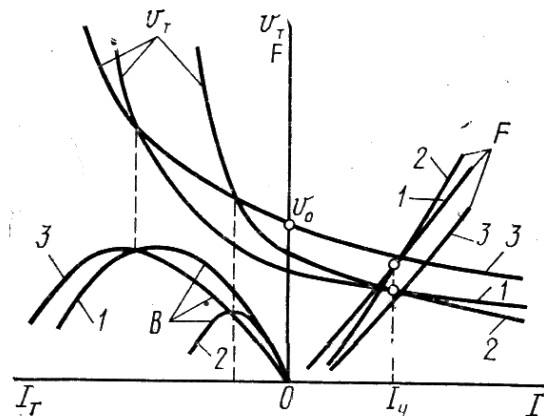


Рис. 2.4. – Залежності $V_T(I_T)$, $F(I_T)$, $B(I_T)$ при різних параметрах обмоток збудження

Все це доводить, що вибір оптимальних характеристик двигуна змішаного порушення, розрахованого на ефективне використання рекуперативного гальмування, є техніко-економічним завданням, що повинна вирішуватися з

обліком припустимого й доцільного збільшення його розмірів для одержання необхідного діапазону швидкості рекуперативного гальмування.

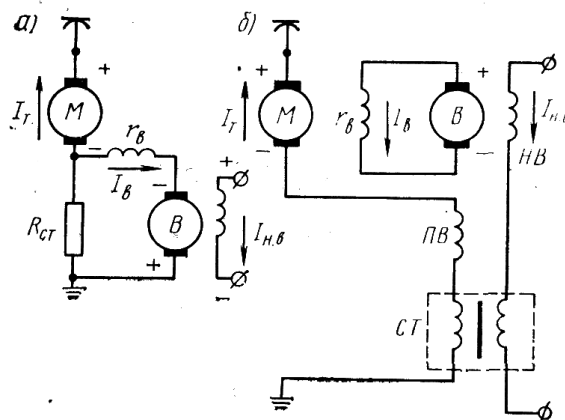


Рис. 2.5. – Схеми рекуперативного гальмування із двигунами послідовного збудження

ТЕД змішаного порушення для електричного рухливого состава міського транспорту з переважною паралельною обмоткою звичайно виконують при відношенні

$$I_{\text{ч}} w_{\text{с}} / (I_{\text{ш.макс}} w_{\text{ш}}) = 0,3 \div 0,4,$$

де $I_{\text{ч}}$ — струм у якорі при годинній потужності двигуна;

$I_{\text{ш.макс}}$ — максимальний струм паралельної обмотки.

Звичайно $I_{\text{ш.макс}} = (1,5 \div 2,0) I_{\text{ш.дл}}$ ($I_{\text{ш.дл}}$ — тривалий струм обмотки паралельного порушення).

Найпростіші схеми рекуперативного гальмування із двигунами послідовного порушення показані на рис. 2.5. Обмотки збудження тягових двигунів при рекуперативному гальмуванні одержують живлення від збудника В. Регулювання режиму гальмування здійснюється шляхом зміни струму $I_{\text{н.в}}$ в обмотці незалежного порушення збудника. У схемі (рис. 2.5, а) характеристики, подібні до характеристик генератора зустрічно – змішаного порушення, виходять за допомогою стабілізуючого опору $R_{\text{сг}}$, по якому протікає сума струмів $I_{\text{т}} + I_{\text{в}}$. До збудника можна підключити будь-яке число паралельних галузей тягових двигунів.

При відповідному виборі $R_{\text{сг}}$ можна одержати практично будь-які гальмові характеристики, причому при всіх величинах $R_{\text{сг}}$ схема працює електрично стійко. Головний її недолік полягає в значній потужності збудника, істотно

перевищуюча потужність порушення тягових двигунів. Дійсно, потужність збудника

$$P_B = (e_B - r_{Я.B} I_B) I_B = I_B^2 r_B + I_B^2 R_{СТ} + I_B I_T R_{СТ}. \quad (2.17)$$

У цьому рівнянні тільки перший член $I_B^2 r_B$ виражає корисну потужність, що вимагається для порушення двигунів, у той час як другий і третій члени — потужність, затрачувану даремно на нагрівання стабілізуючого опору. Ця потужність збільшується з підвищенням $R_{СТ}$. Зазначений недолік усунутий у схемі, зображеної на рис. 2.5, б. Збудник у цій схемі має дві обмотки збудження: незалежну НВ і протизбудження ПВ. Обмотка НВ, так само як й у схемі на рис. 2.5, а, одержує живлення від генератора керування або акумуляторної батареї. Обмотка ПВ включена послідовно з якорем ТЕД. Її МРС спрямована зустрічно стосовно переважної МРС обмотки НВ. Тому при збільшенні гальмового струму МРС обмотки ПВ збільшується, а ЕРС збудника e_B зменшується й, отже, зменшується струм порушення тягових двигунів (генераторів) як при зустрічно-змішаном порушенні.

Звичайно збудник має привод від окремого двигуна з паралельним або змішаним порушенням. Приводний двигун доцільно використати не тільки для збудника, але й для інших допоміжних механізмів, наприклад для вентиляторів і генераторів керування. У деяких схемах збудник приводиться в рух від однієї з колісних пар.

Характер перехідних процесів у схемі, зображеної на рис. 2.5, б, істотно відрізняється від іншої схеми рис. 2.5, а, тому що зміна струму в якорі ТЕД передається в коло його порушення тільки через магнітну систему збудника, тобто з деяким запізнюванням. Крім того, при зміні струму I_T в обмотці незалежного порушення збудника наводиться ЕРС взаємної індукції, що прагне затримати зміна магнітного потоку збудника. При більшому ступені протизбудження (більшій МРС обмотки ПВ) у схемі можлива поява незатухаючих коливань. Для усунення цих недоліків у схему вводиться стабілізуючий трансформатор СТ. Первинна обмотка СТ включається в ланцюг якоря ТЕД, а вторична - у коло незалежної обмотки збудника. При перехідних процесах у вторичній обмотці стабілізуючого трансформатора наводиться ЕРС, що врівноважує ЕРС взаємної індукції в обмотці незалежного порушення збудника. При цьому можна усунути незатухаючі коливання й поліпшити

протікання перехідних процесів. Із цією метою корисно вводити в коло якоря ТЕД додаткову індуктивність.

В теперішній час на електричному рухливому составі з ТЕД змішаного порушення рекуперативне гальмування застосовують тільки для гальмування на спусках й як засіб зниження швидкості. Керування цим гальмуванням здійснюється на ходових позиціях контролера керування. Його не використовують для службового гальмування перед зупинкою, тому що при цьому водій повинен виконувати значне число операцій у досить короткий час, що незручно для процесу керування.

Принципово можливе використання рекуперативного гальмування із двигунами змішаного порушення як засіб зупинки; однак при відносно низьких швидкостях повідомлення на міському транспорті (малому відношенні швидкості повідомлення до максимального й низької швидкості початку гальмування) воно не може бути досить ефективним.

На електричному рухливому составі міського транспорту, обладнаному ТЕД послідовного порушення, рекуперативне гальмування не одержало поширення.

2.4 Електрична схема тролейбуса ЗіУ і алгоритм її роботи

Тяговий електропривід забезпечує наступні експлуатаційні режими:

- рух тролейбуса з різними швидкостями в діапазоні від 5 до 70 км/год;
- плавний автоматичний безреостатний пуск і електродинамічне (стежає реостатно-рекуперативне) гальмування з широкими межами зміни прискорення і уповільнення, що задаються водієм;
- практично миттєвий автоматичний перехід з реостатного на рекуперативне гальмування і назад в залежності від наявності або відсутності споживачів рекуперуючої електричної енергії на ділянці контактної мережі;
- рух тролейбуса вибігом;
- зміна напрямку руху.

Схемою також передбачений швидкодіючий електронний захист електроустаткування тролейбуса від перевантажень по струму, напрузі і від короткочасної перерви живлення (нульовий захист).

Режим роботи тягового електродвигуна задається за допомогою безконтактного пристрою – контролера водія, механічно пов'язаного з пусковою і гальмівною педалями.

Силкові тягові кола (рис. 2.6) одержують електроенергію з контактної мережі постійного струму з номінальною напругою на струмоприймачах 550В.

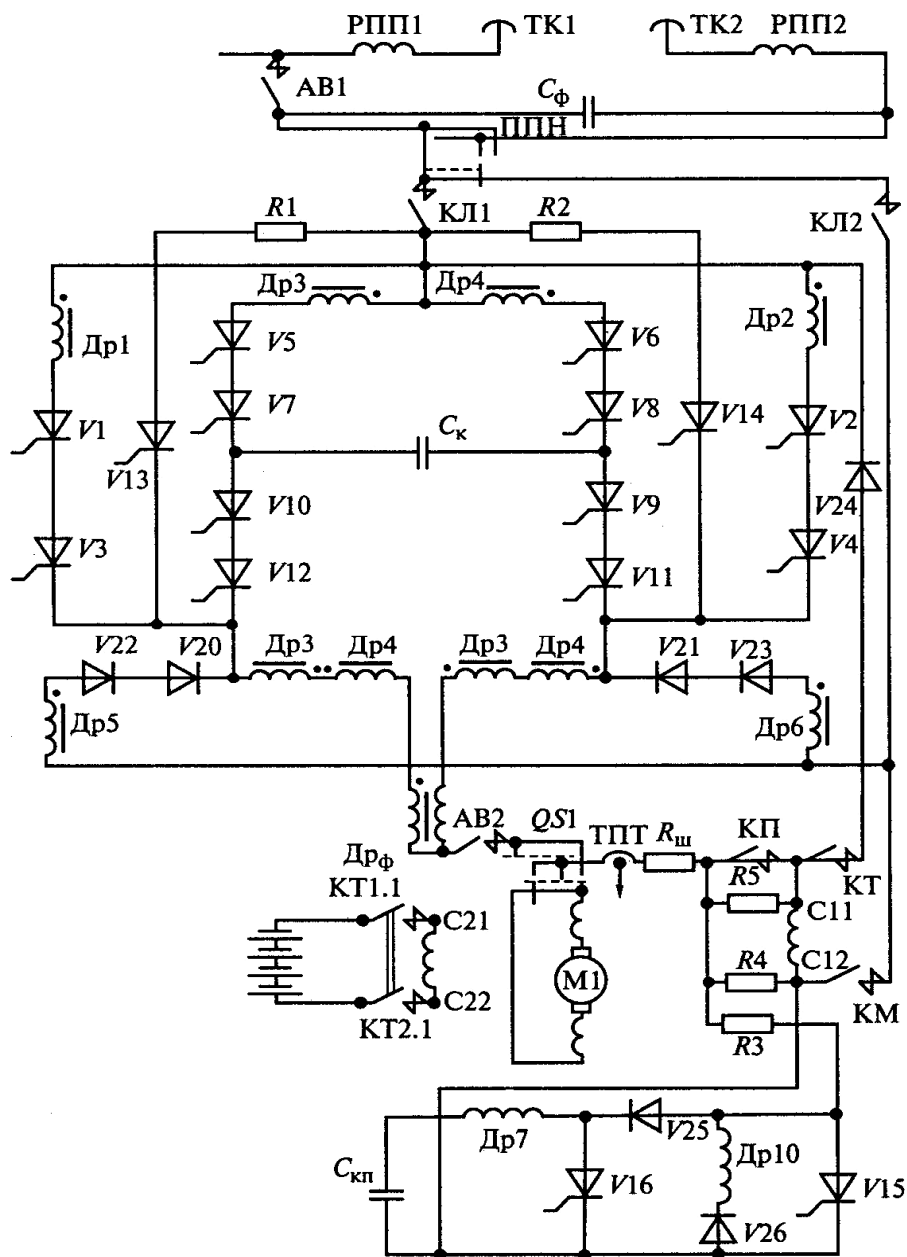


Рис. 2.6 – Спрощена схема силових кіл тролейбуса ZiY

Кола управління одержують електроенергію від генератора або статичного перетворювача напруги, що працює паралель з акумуляторною батареєю з номінальною напругою 24В.

На рис. 2.6 позначені: М1 — тяговий електродвигун; $D_{\text{рф}}$ — двофазний реактор; V20...V23 — нульові діоди; АВ1, АВ2 — автоматичні вимикачі; КЛ1, КЛ2, К.П, КМ, КГ, КТ1 — контактори; ТПТ — датчик струму; V1...V4, V15 — головні тиристори; V5... V12, V16 — комутуючі тиристори; V13, V14 — гальмівні тиристори; V24 — діод; V25 — розділовий діод; V26 — зворотний діод; $C_{\text{к}}$, $C_{\text{кп}}$ — комутуючі конденсатори; QS1 — ревестор; ТК1, ТК2 — струмоприймачі; РПП1, РПП2 — радіореактори; $D_{\text{р1}}$, $D_{\text{р2}}$, $D_{\text{р5}}$, $D_{\text{р6}}$ — дроселі; $D_{\text{р3}}$, $D_{\text{р4}}$ — реактори насичення; $D_{\text{р7}}$ — комутуюча котушка індуктивності; $D_{\text{р10}}$ — лінійний дросель; ППН — перемикач полярності напруги; Rш — шунт амперметра; R1, R2 — резистори.

Силове коло тролейбуса ЗиУ-683Б представлено на рис. 2.6. Воно включає наступні основні вузли і елементи: тиристорно-імпульсний регулятор напруги (ТІРН); тиристорно-імпульсний регулятор збудження (ТІРЗ); тяговий електродвигун ДК-211 з номінальною потужністю 150кВт; перемикач полярності напруги ППН; вхідний фільтр, що складається з двофазного реактора $D_{\text{рф}}$ і нульових діодів V20...V23; два автоматичні вимикачі АВ1 і АВ2; контактори КЛ1, КЛ2, К.П, КМ, КТ і КТ1; датчики напруги і струму (показано на схемі не всі) ТПН1, ТПН2 і ТПТ.

Тиристорно-імпульсний регулятор напруги (ТІРН) призначений для регулювання напруги на ТЕД тролейбуса при пуску і гальмуванні. У ТІРН застосований двофазний тиристорно-імпульсний переривник із загальним вузлом комутації без попереднього перезаряду комутуючої місткості. Силова схема ТІРН включає: комутуючі тиристори V5... V12; головні тиристори V1... V4; гальмівні тиристори V13, V14; нульові діоди V20... V23; один гальмівний діод V24; вхідний фільтр, що складається з РПП1, РПП3, $C_{\text{ф}}$; комутуючий конденсатор $C_{\text{к}}$; струмообмежуючі реактори насичення $D_{\text{р1}}$... $D_{\text{р4}}$; реактори насичення $D_{\text{р5}}$, $D_{\text{р6}}$; фазний реактор $D_{\text{рф}}$; RC-кола, що шунтують силові напівпровідникові прилади (на схемі не показані).

Тиристорно-імпульсний регулятор збудження (ТІРЗ) використовується для регулювання струму збудження ТЕД тролейбуса з метою розширення діапазону швидкостей. У ТІРЗ застосовується однофазний регулятор. Силова схема ТІРЗ складається з головного тиристора V15 із зворотним діодом V26, лінійного дроселя $D_{\text{р10}}$, комутуючого тиристора V16, розділового діода V25, комутуючого конденсатора $C_{\text{кп}}$ і комутуючої котушки індуктивності $D_{\text{р7}}$.

Основні технічні дані тиристорно-імпульсного регулятора напруги і тиристорно-імпульсний регулятор збудження приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні дані ТІРН і ТІРЗ

Тиристорний регулятор напруги	
Вхідна напруга силового кола номінальна, В	550
Максимальна напруга силового кола, В	720
Номінальний струм, А	320
Максимальний пусковий струм, А	440
Максимальна вихідна потужність, кВт	317
Частота регулювання на навантаженні, Гц	200÷800
Тиристорний регулятор збудження	
Максимальний струм, А	320
Частота регулювання на навантаженні, Гц	100÷400

Підготовка схеми до пуску. Для приведення схеми в робочий стан необхідно виконати наступні дії:

- а) встановити струмоприймачі на контактні дроти;
- б) включити:
 - вимикачі допоміжного двигуна і двигуна компресора;
 - вимикач акумуляторної батареї;
 - вимикач управління;
 - вимикач компресора ВУК;
 - тумблер «Запуск перетворювача»;
- в) вечірній час включити вимикачі освітлення приміщення для пасажирів, підніжок, показчиків маршруту, габаритних вогнів і т.п.

Після наповнення стислим повітрям пневматичної системи повітрям рукоятку реверсора на контролері управління встановлюють в положення, відповідне наміченому напрямку руху. Потім включають автоматичні вимикачі, розташовані на перегородці в кабіні водія.

Пуск тягового електродвигуна. При натисненні на ходову педаль контролера водія включаються контактори КЛ1, КЛ2, КМ і із затримкою 0,2 з КП. Безконтактний пристрій контролера перетворює глибину натиснення педалі в ходовий сигнал напруги, причому величина сигналу напруги пропорційна глибині натиснення правої педалі (датчики Холу). Сигнал напруги поступає в блоки кіл управління, а потім у вигляді управляючих імпульсів в певній

послідовності — на тиристори ТІРН. Спочатку включаються попарно комутуючі тиристори V5, VI, V9, КП або V6, V8, V10, V12.

При включенні тиристорів V5, VI, V9, V11 утворюється коло живлення ТЕД через комутуючий конденсатор C_k : плюс контактного дроту, струмоприймач ТК1, радіореактор РПП1, автоматичний вимикач АВ1, перемикач полярності напруги ППН, контактор КЛ1, реактор насичення D_{p3} , тиристори V5 і VI, комутуючий конденсатор C_k , тиристори V9 і V11, реактори насичення D_{p4} і D_{p3} , двофазний реактор $D_{pф}$, автоматичний вимикач АВ2, реверсор QS1, якорь ТЕД (М1), QS1, шунт амперметра $Я_{ш}$, резистор R5, послідовна обмотка збудження ТЕД, контактори КМ, КЛ2, ППН, РПП2, ТК2, мінусової контактний дріт.

Після того, як конденсатор C_k зарядиться до напруги контактної мережі, струм в колі припиняється, і тиристори V5, VI, V9, V11 закриваються, унаслідок чого споживання електроенергії з мережі припиняється. Проте завдяки енергії, накопиченій в обмотках реактора $D_{pф}$ і ТЕД, струм в останньому не спадає до нуля, а замикається через нульові діоди по ланцюжку (М1, QS1, $R_{ш}$, R4, обмотка збудження ТЕД (C_{12} , C_{12}), V23 і V21, D_{p4} , D_{p3} , $D_{pф}$, АВ2, QS1, М1).

У наступний напівперіод регулювання струм протікає з контактної мережі аналогічним чином, але по комутуючих тиристорах V6, V8, V10, V12 і обмотці другої фази $D_{pф}$. Через 0,2 із замикається контактор КП, який шунтує резистор R5.

Цей режим використовується для пуску тролейбуса з малим прискоренням і рухи з малою швидкістю (маневровий режим).

Далі з випередженням по відношенню до комутуючих тиристорів включаються головні тиристори V1, V3 або V2, V4. Ширина імпульсу напруги на ТЕД при цьому збільшується на час випередження. Виключення головних тиристорів відбувається у момент включення відповідної групи комутуючих тиристорів, внаслідок чого до головних тиристорів прикладається зворотна напруга.

Головні тиристори V1 і V3 закриваються при включенні комутуючих тиристорів V6, V8, V10, V12, а головні тиристори V2 і V4 — при включенні комутуючих тиристорів V5, V7, V9, V11.

У міру розгону тролейбуса відбувається збільшення коефіцієнта заповнення ТІРН, унаслідок чого напруга, прикладена до ТЕД, поступово зростає до напруги контактної мережі.

Після завершення роботи регулятора напруги вступає в дію регулятор поля ТІРЗ, підключений паралель послідовній обмотці збудження ТЕД. Для підвищення стабільності роботи ТІРЗ первинний заряд комутуючого конденсатора $C_{\text{кп}}$ здійснюється від допоміжного перетворювача напруги. Спочатку подають імпульс на управляючий електрод головного тиристора К15. При включенні тиристора К15 відбувається шунтування обмотки збудження ТЕД через резистор R3. Потім включають комутуючий тиристор V16, який через D_{p7} перезаряджає комутуючий конденсатор $C_{\text{кп}}$; негативна напруга прикладається до головного і комутуючого тиристорів, після чого вони закриваються, а струм, що протікає через головний тиристор, витісняється по розділовому діоду V25 в комутуючий конденсатор $C_{\text{кп}}$, готуючи його до наступного циклу.

Зворотна напівхвиля перезаряду коливального контуру проходить через зворотний діод V26, лінійний дросель D_{p10} і розділовий діод V25. Після виключення тиристорів V15 і V16 струм шунтового кола протікатиме по резистору R4. Із зміною співвідношення часу включеного і вимкненого стану тиристорів міняється величина ефективного опору резистора R4 і, отже, ступінь ослаблення поля.

Після завершення роботи ТІРЗ ТЕД виходить на режим максимального ослаблення поля і найбільшої швидкості.

Електричне гальмування. При натисненні на ліву гальмівну педаль включаються контактори КЛ1, КЛ2, КТ і КТ1. Останній використовується для перемагнічування магнітної системи ТЕД. У цей момент, як і при пуску, управляючі імпульси подаються на комутуючі тиристори ТІРН, а також на головний тиристор V15 ТІРЗ. Таке включення тиристорів відповідає режиму передпозиції гальмування (процес самозбудження ТЕД). Перемагнічування магнітної системи ТЕД відбувається за допомогою додаткової обмотки, що підключається контактором КТ1 до акумуляторних батарей (плюс акумуляторної батареї, КТ1.1, С21, С22, КТ2.1, мінус акумуляторної батареї). Також утворюється коло живлення ТЕД через комутуючі тиристори (МІ, QС1, R_ш, R5 паралель R4, С21, С11, далі КТ, діод V24, тиристори V5, V7, конденсатор $C_{\text{к}}$, тиристори V9 і V11, D_{p4} , D_{p3} , $D_{pф}$, АВ2, QС1, МІ).

Таке ж коло утворюється і при включенні комутуючих тиристорів V6, V8, V10 і V12. У міру збудження ТЕД відбувається наростання напруги на $C_{\text{к}}$, і при певному його рівні починають працювати головні тиристори V1, V3 або V2, V4. У момент їх включення в колі ТЕД проходить збільшений струм,

запасається електрична енергія у фазному реакторі. У періоди пауз завдяки накопиченій енергії відбувається різке зростання напруги, і струм при цьому йде в контактну мережу (M1, R5, KT, K24, KЛ1, плюс джерела живлення; споживач — тролейбуси, що знаходяться на ділянці живлення; мінус джерела живлення; KЛ2, V23, V21, Д_{рф}, АВ2, QS1, M1). Так відбувається рекуперативне електродинамічне гальмування. Перехід з рекуперативного на реостатне гальмування у разі відсутності споживачів електроенергії на лінії здійснюється автоматично за допомогою тиристорів V13 і V14. У ланцюг ТЕД при цьому паралельно головним тиристорам включається резистор R1 або R2.

У таблиці 2.2 приведені індикатори, що свідчать про можливі несправності тиристорно-імпульсної системи управління (ТІСУ) за допомогою вбудованої системи діагностики.

Таблиця 2.2 – Індикація про можливі несправності тиристорно-імпульсної системи управління

Найменування індикаторів	Призначення індикаторів
1	2
Лампочка «ППН»	Лампочка свідчить про роботу перетворювача постійної напруги блоку управління. Якщо вона гасне те запуск ППН повторити. У разі повторної відмови необхідно встановити характер несправності і усунути її.
Лампочка «Регулювання збудження»	Лампочка спалахує при роботі регулятора збудження. Якщо в режимі роботи регулятора збудження лампочка гасне, то необхідно встановити вид несправності по пристрою вбудованої діагностики.
Лампочка «ВПН»	Лампочка спалахує при роботі допоміжного перетворювача напруги. При згасанні лампочки необхідно повторити запуск, а внаслідок відмови встановити характер несправності у ВПН.

1	2
Лампочка «обесточка»	Лампочка «обесточка» спалахує за відсутності напруги на струмоприймачах або неправильної полярності. У разі зворотної полярності горить неонові лампочка, тоді необхідно перевести ручку перемикача полярності в інше положення. Автоматичний вимикач АВ1 повинен бути
Дзвінок «зумер»	Дзвінок подає сигнал за відсутності напруги на струмоприймачах.
Лампочка «Відмова БУ»	Лампочка спалахує при виході з ладу блоку управління. В цьому випадку необхідно відкрити люк відсіку, де поміщається блок управління, і по пристрою вбудованої діагностики визначити номер несправної плати.
Лампочка «Струм перевантаження»	Лампочка спалахує при аварійному режимі і спрацювання захисту при підвищенні струму ТЕД вище допустимого.

2.5 Розрахунок сил тяги і уповільнення

2.5.1 Розрахунок сил, які діють на тролейбус під час руху

Характер руху тролейбуса, визначають прикладеними до нього силами. Розрізняють сили: керівники – сила тяги F і сила уповільнення B , і сили не керівники – сили опору руху W . Сили F і B створюються тяговим електроприводом і реалізуються за допомогою присутності сил $F_{\text{сц}}$ зчеплення рушійних коліс з рейками або дорожнім покриттям.

Необхідним для нормального (без боксування і юза) рух тролейбуса, умовами є виконанням нерівність:

$$F \leq F_{\text{сц}}, \quad B \leq F_{\text{сц}} \quad (2.18)$$

Рівнодіюча $F_{\text{д}}$ сила, прикладена до тролейбуса, визначається рівнянням:

$$F_{\text{д}} = F - B \pm W \quad (2.19)$$

Позитивний напрям сил в рівнянні (2.19) співпадає з напрямом руху тролейбуса.

Рух тролейбуса під дією прикладених сил (2.19) описується рівнянням руху:

$$m(1+\gamma)dv/dt = \varepsilon(F - B \pm W), \quad (2.20)$$

де m – розрахункова маса тролейбуса;

$(1+\gamma)$ – коефіцієнт інерції обертаючих частин електроприводу (таблиця 2.1);

dv/dt – прискорення a або уповільнення b ;

ε – коефіцієнт приведення розмірності величин до єдиної системи одиниць.

У режимі тяги:

$$B = 0, \quad F_d = (F - W) > 0, \quad (dv/dt)_{cp} = a > 0.$$

У режимі втомленого руху:

$$B = 0, \quad F = W, \quad F_d = 0, \quad dv/dt = 0$$

У режимі вибігу (рух без струму):

$$F = B = 0, \quad F_d = -W < 0, \quad dv/dt < 0$$

У режимі уповільнення:

$$F = 0, \quad F_d = -(B + W) < 0, \quad (dv/dt)_{cp} = b$$

Повний опір руху W мають дві складових:

$$W = W_o + W_{доп},$$

W_o – основний опір руху, залежить від швидкості тролейбуса;

$W_{доп}$ - додатковий опір руху, не залежить від швидкості тролейбуса, визначається наявністю схилу, кривих і т.п.

У дипломі для розрахунку сил W використовується питомий опір руху W_{ε} на еквівалентному перегоні, визначається емпіричною формулою [1]:

$$W_{\varepsilon} = A + B \cdot V^2 \text{ [Н/кН]}, \quad (2.21)$$

При цьому:

$$W = w_{\text{э}} \cdot m \cdot g \text{ [H]}, \quad (2.22)$$

де m - маса РС в т., $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

2.5.2 Розрахунок сил зчеплення

Сила $F_{\text{сц}}$ розраховується по формулі:

$$F_{\text{сц}} = G_{\text{сц}} \cdot \psi; \quad G_{\text{сц}} = m \cdot g \cdot \delta, \quad (2.23)$$

де $G_{\text{сц}}$ – зчеплена вага РС, сила натиску всіх рухомих коліс на шлях;
 ψ - коефіцієнт зчеплення (таблиця 2.3);

δ - коефіцієнт використання ваги Р тролейбуса (таблиця 2.3)

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів

Вигляд РС	(1+ γ)	ψ	δ
Тролейбус:			
2-ох вісний	1,15	0,35	0,6
3-ох вісний			0,75

$$G_{\text{сц}} = 20 \cdot 9,81 \cdot 0,6 = 117,72 \text{ т}$$

$$F_{\text{сц}} = 117,72 \cdot 0,35 = 41,202 \text{ кН}$$

2.5.3 Розрахунок сил опору руху

Формула (2.7) розрахунку питомого опору руху $W_{\text{э}}$ для різних видів тролейбусів:

$$W_{\text{э}} = 12 + 0,004V^2 + i_{\text{э}}, \quad (2.24)$$

где V – швидкість РС, км/год,

$i_{\text{э}} = 3\%$ - розрахунковий ухил еквівалентного перегону,

G – вага вагону, т.

$$W_{\Sigma} = 12 + 0,004 \cdot 502 + 0,03 = 22,03$$

Сила W опору руху по для ряду значень швидкості V в діапазоні від 0 до V_{\max} . Дані розрахунків наводимо до таблиці 2.4 за наслідками її будуємо графік залежності $W(V)$ (рис 2.7).

Таблиця 2.4 – Значення опору руху в діапазоні швидкості

$V, \text{км/г.}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$W_{\text{н}}, \text{Н}$	12,03	12,13	12,43	12,93	13,63	14,53	15,63	16,93	18,43	20,13	22,033

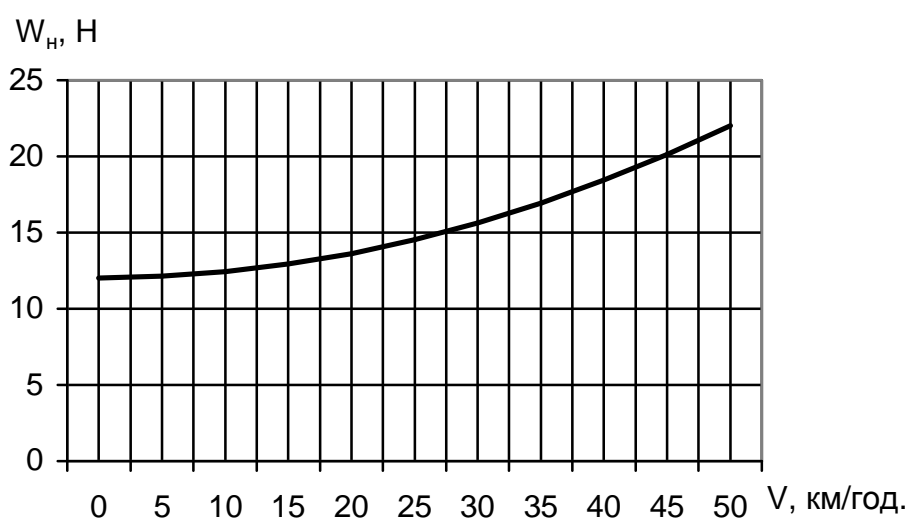


Рис. 2.7 – Графік залежності $W(V)$

2.5.4 Розрахунок сили тяги

Розрахунок сил тяги F проводиться на основі рівняння руху (2.20) для режиму пуску ($F_{\text{тр}}$) з початковим прискоренням $a_{\text{поч}} = (0,3 \dots 0,4) \text{ м/с}^2$ і для режиму розгону ($F_{\text{пп}}$) із заданим прискоренням a до швидкості V_1 виходу тягового електродвигуна на автоматичну характеристику повного поля.

$$F_{\text{тр}} = m(1+\gamma)a_{\text{поч}} + W(0), \quad (2.25)$$

где $W(0) = W|_{v=0}$ – по розрахунками розділу 2.5.3.

$$F_{\text{тр}} = 20 \cdot 1,15 \cdot 0,3 + 12,03 = 18,93 \text{ кН}$$

$$F_{пп} = m(1+\gamma)a + W_{ср}, \quad (2.26)$$

где $W_{ср} = \frac{1}{V_1} \int W(V) dV,$

Швидкість V_1 виходу на автоматичну характеристику повного поля для сучасних видів тролейбуса з тяговими двигунами послідовного і змішаного збудження лежать в межах 18...23 км/год. Приймаємо значення $V_1 = 20$ км/год.

З урахуванням лінійного характеру залежності $W(V)$ в цьому діапазоні наближення можна розрахувати як:

$$W_{ср} = \frac{W_{(0)} + W_{(V_1)}}{2}, \quad (2.27)$$

$$W(V_1) = 12 + 0,004 \cdot 202 + 0,03 = 13,63$$

$$W_{ср} = (12,03 + 13,63) / 2 = 12,83$$

$$F_{пп} = 20 \cdot 1,15 \cdot 0,75 + 12,83 = 30,08 \text{ кН}$$

У режимі ослаблення поля сила тяги $F_{оп}$ може бути розрахована після вибору тягового двигуна з урахуванням його характеристик.

2.5.5 Розрахунок сили гальмування

Розрахунок сили гальмування $В_{пп}$ проводиться на основі рівняння (2.20) для режиму повного поля

$$В_{пп} = m(1+\gamma) \cdot b - W_{ср}, \quad (2.28)$$

де $W_{ср}$ - по розрахунку рівняння (2.9)

$$В_{пп} = 20 \cdot 1,15 \cdot 1,2 - 12,83 = 14,77 \text{ кН}$$

Одержані (2.25) і (2.27) значення сил перевіряємо на виконання умов (2.18), зіставивши їх із значеннями сил зчеплення (2.23).

$$30,08 \leq 41,202; \quad 14,77 \leq 41,202.$$

По цим даним ми бачимо, що умови виконуються.

Максимальну потужність $P_{\text{макс}}$ тягові електродвигуни віддають при розгоні тролейбуса і під час виходу їх на автоматичну характеристику повного поля.

Швидкість V_1 виходу на автоматичну характеристику приймаємо рівною 20 км/год.

$$P_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{пп}} V_1}{\eta}, \quad (2.29)$$

де $F_{\text{пп}}$ – сила тяги по рівнянню (2.25),

$$V_1 = 20 \text{ км/год.}$$

$\eta_9 = 0,83 \dots 0,87$ - ККД електропередачі (ТЕД на ободі колеса).

$$P_{\text{макс}} = 30,08 \cdot 20 / 0,87 = 691,49 \text{ кВт}$$

Потужність P_v ТЕД в режимі встановленого руху тролейбуса з максимальною швидкістю $V_{\text{макс}}$:

$$P_v = \frac{W_{(\text{макс})} \cdot V_{(\text{макс})}}{\eta},$$

где $W_{\text{макс}} = W|_{v=V_{\text{макс}}}$

$$P_v = 22,033 \cdot 13,89 / 0,87 = 351,77 \text{ кВт.}$$

2.6 Вибір тиристора, що замикається, – GTO

2.6.1. Характеристика тиристора, що замикається

У 1955р. був вперше створено напівпровідний керуючий прилад, з чотирьохшаровою структурою і "тиристор", що одержав назву.

Тиристор включається подачею імпульсу на електрод управління при позитивній полярності напруги між анодом і катодом. Включення тиристора

забезпечується зниженням протікаючого через його прямого струму до нуля, для цього розроблено багато схем індуктивно-ємних контурів комутації. Вони не тільки збільшують ціну перетворювача, але і погіршують його масогабаритні показники, знижують надійність.

Тому одночасно із створенням тиристора почалися дослідження, направи на забезпечення його відключення по управляючому електроду. Перші такі тиристори з'явилися в 1960 р. у США. Вони одержали назву Gate Turn Off (GTO). У нашій країні вони відоміші як тиристори, що замикаються.

Запираємий тиристор - повністю управляючий напівпровідний прилад, в основі якого класична чотирьохшарова структура.

Включають і вимикають його подачею позитивного і негативного імпульсів струму на електрод управління. На рис. 2.8 приведені умовні позначення і структурна схема тиристора, що замикається. Подібно звичному тиристорі він має катод К, анод А, управляючий електрод G.

Різниця в структурах пристроїв полягає в новому розташуванні горизонтальних і вертикальних шарів з n- і p-провідністю.

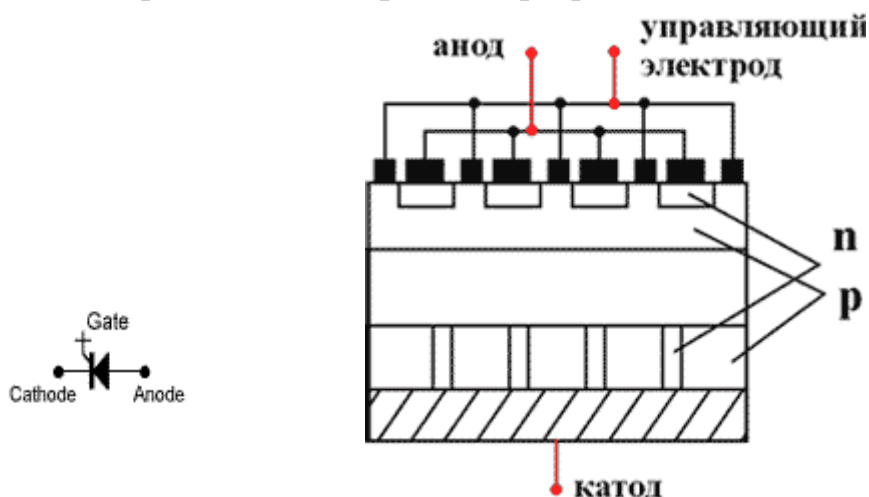


Рис. 2.8 – Запираємий тиристор: умовне позначення; структурна схема

Головне виконання тиристорів GTO пігулка з чотирьохшаровою кремнієвою пластиною, затисненою через термокомпенсуючі молібденові диски між двома мідними підставами, що володіють підвищеною тепло і електропровідністю. З кремнієвою пластиною контактує управляючий електрод, з висновком в керамічному корпусі. Пристрій стискається контактними поверхнями між двома половинами радіаторів, ізольованих один від одного. Конструкцію, визначають типом системи охолодження.

У режимі роботи тиристора GTO розрізняють чотири фази: включення, провідне стан, виключення і режим блокування.

Використовування тиристорів GTO потребує застосування спеціальних захисних кіл. Вони збільшують масогабаритні показники, і ціну перетворювача, іноді потрібне додаткове охолодження, проте це на сьогодні є поширеним для більшості.

Призначення різних захисних кіл - обмеження швидкості наростання одного з двох параметрів електричної енергії при комутації напівпровідникового пристрою. При цьому конденсатори захисних кіл СВ (рис. 2.9) підключають тиристор, що паралельно захищається. Вони обмежують швидкість наростання прямої напруги dU_T/dt при відключенні тиристора.

Дросель L_E включають послідовно з пристроєм Т. Он обмежують швидкість наростання прямого струму dI_T/dt при включенні тиристора. Значення dU_T/dt і dI_T/dt для кожного пристрою нормований, їх указують в довідниках і паспортних даних на прилади.

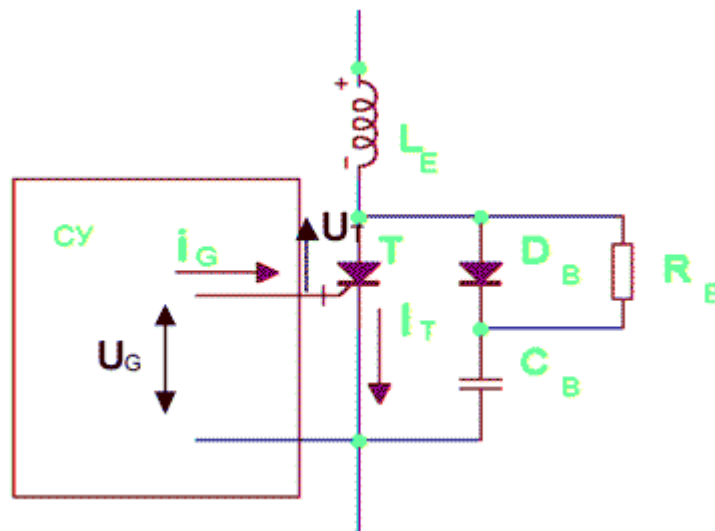


Рис. 2.9 – Схема захисного кола

Окрім конденсаторів і дроселів, в захисних колах використовують додаткові елементи, що забезпечують розряд і заряд реактивних елементів. До них відносять: діод D_B , який шунтує резистор R_B при виключенні тиристора Т і заряд конденсатора C_B , резистор R_B , який обмежує струм розряду конденсатора C_B при включенні тиристора Т.

2.6.2 Система керування

Система керування містить наступні функціональні блоки: вмикаючий контур з ключем SE, який складається зі схеми формування відкриваючого імпульсу і джерела сигналу для підтримки тиристора у відкритому стані; контур формування вимикаючого сигналу і сигналу підтримки тиристора в закритому стані з ключем SA; логічний блок St, який формує сигнал управління тиристора; пристрій гальванічної розв'язки UE і UA, які забезпечують гальванічну розв'язку схеми управління і силового кола тиристора.

По даних розрахунках і по даній базової схеми я вибираю тип тиристора 5SGA 20H2501 з $I_{TGQM} = 2000A$, $V_{DRM} = 2500V$. Його початкові дані і характеристики (рис. 2.10):

$$V_{DRM} = 2500V$$

$$V_T = 2.80V,$$

$$I_T = 2000A$$

$$t_r = 3.5 \mu s$$

$$E_{on} = 0.75 Ws$$

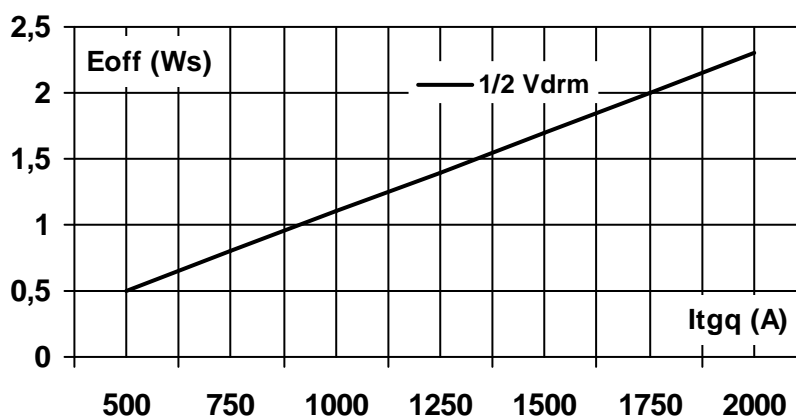
$$t_s = 22.0 \mu s$$

$$E_{off} = 3.2 Ws$$

$$T_j = -40 \dots 125^\circ C$$

$$R_{thJC} = 17K/k$$

$$R_{thCH} = 5K/k$$



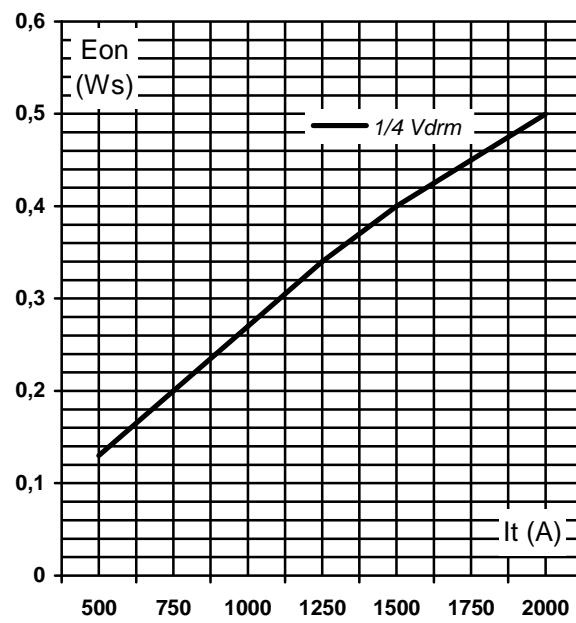


Рис. 2.10 – Вольтамперні характеристики тиристора 5SGA 20H2501

3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ВАГОНІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

3.1. Рекуперативне гальмування

Застосування в схемі силового кола вагона тиристорних регуляторів дозволяє забезпечити режим рекуперативного гальмування. При цьому режим теоретично можна повернути в мережу більшу частину кінетичної енергії, який володіє вагон до моменту початку гальмування.

Якщо умовно прийняти $\eta_t=0,8\div0,75$, то при існуючих швидкостях сполучення енергія рекуперації може становити близько 20% енергії, затрачуваної на тягу вагона. При підвищенні швидкості сполучення на 10–12% енергія рекуперації зростає до 30–35%.

Застосування тільки рекуперативного гальмування на вагонах метрополітену за умовами забезпечення безпеки руху неприпустимо. У випадку зникнення напруги в контактній мережі або споживача електричної енергії в схемі силового кола вагона повинен бути передбачений автоматичний перехід на слідкуюче рекуперативно-реостатним або реостатне гальмування. Крім того, для узгодження напруг на тягових машинах і в контактній мережі при рекуперативному гальмуванні в коло тягових машин включений резистор. Наявність резистора приводить до того, що рекуперативна енергія зменшується:

$$A_p = A_t \eta_t \eta_p \quad (3.1)$$

де η_p - схемний к. п. д. рекуперації, яким ураховуються втрати енергії в резисторі.

У міру зниження швидкості початок гальмування η_p збільшується і при $v_t=32$ км/год становить 100%. при $v_t=32$ км/год напруга на двох тягових машинах дорівнює 800В и для здійснення рекуперативного гальмування резистор не потрібен, тому він шунтується. Із цього видно, що η_p мало залежить від напруги в контактній мережі й становить приблизно 0,5, тобто порівняно невеликий. Збільшити схемний к.к.д. рекуперації можливо двома шляхами: плавним регулюванням опору в міру зниження швидкості руху вагона й введенням режиму гальмування з шунтуванням.

Для регулювання опору резистора необхідно використати тиристор із системою гасіння або використати для його вимикання пристрій для вимикання переривника, що повинне одночасно виключати тиристор і тиристири переривника.

Збільшення схемного к.к.д. рекуперації при роботі вагона не в години «пик» досягається завдяки тому, що гальмування здійснюється при зашунтованому резисторі.

При напрузі в контактній мережі 800В, гальмування вагона 81.717 (уставка по струму 400А) і швидкості початку гальмування 70 км/год перехід до режиму гальмування із зашунтованим резистором приводить до збільшення гальмових шляхів у порівнянні із граничними на 13%, а час гальмування на 11%. Використання режиму рекуперативного гальмування з зашунтованим резистором дозволяє забезпечити схемний к. п. д. рекуперації $\eta_r = 1$ і в 1,4 рази підвищити енергію рекуперації в порівнянні із граничним режимом рекуперативного гальмування завдяки виключенню втрат у резисторі. Слід зазначити, що використання рекуперативного гальмування з $\eta_r = 1$ і збільшеними гальмовими шляхами вносить певну специфіку в процесі керування вагоном і вимагає додаткових пророблень, пов'язаних із системою керування вагоном, організацією руху й забезпеченням безпеки руху. Таким чином, при існуючих швидкостях руху й $\eta_r \approx 0,5$ економія електричної енергії від використання рекуперативного гальмування становить близько 10% всієї енергії, споживаної на тягу. Зі збільшенням швидкості повідомлення на 10 – 15% і схемного к. п. д. $\eta_r \approx 0,7$ цей показник збільшиться до 17%.

3.2. Імпульсний безреостатний пуск й рекуперативно-реостатне гальмування тягових машин

Втрата електроенергії на тягу при імпульсному безреостатному пуску й рекуперативно-реостатному гальмуванні тягових машин складається із втрат: на тягових підстанціях і в контактній мережі, у тиристорних перетворювачах, зубчастих передачах, на подолання основного опору руху.

На тягових підстанціях метрополітену встановлюють випрямні агрегати УВКМ-5М, УВКМ-6, коефіцієнт корисної дії яких при випрямленому струмі 1600-3200А становить 97,5%. З урахуванням втрат у зрівнювальних реакторах к.п.д. тягової підстанції може бути прийнятий 0,95.

Втрати в контактній мережі являють собою різницю між енергією, що надійшла від підстанції, і енергією, споживаної електропоїздом. Енергопостачання вагонів здійснюється від контактної рейки, що має площу перерізу 6600 мм² і питомий опір 0,122- 0,134 Ом ·мм²/м.

Повний опір тягової мережі являють собою суму опорів контактної рейки, рейкової колії, що живлять і відсмоктують кабелів. Втрати потужності в тяговій мережі:

$$\Delta P_{\text{тс}} = \sum_1^n I_{\text{пі}} R_{\text{тс}} \quad (3.2)$$

де I_{ni} - пусковий струм тягових машин, А;

$R_{\text{тс}}$ – опір тягової мережі, Ом.

Середній к.к.д. тягової мережі метрополітену при напрузі 825В становить 0,92 – 0,94.

Втрати в тягових машинах складаються із втрат: електричних, у сталі, механічних і додаткових. Як відомо, електричні втрати в обмотках тягової машини:

$$\Delta P_{\text{э}} = k \frac{v_{\text{п}}^2}{U_{\text{дв}}^2} r_{\text{дв}} \quad (3.3)$$

Додаткові втрати для машин постійного струму при номінальному навантаженні приймають при відсутності компенсаційної обмотки рівними 1% підведеної потужності. Для інших навантажень ці втрати перераховують пропорційно квадрату струму навантаження. У машинах постійного струму потужність до 500кВт механічні втрати становлять відповідно близько 0,2 – 1% номінальної потужності машини. Механічні втрати складаються із втрат: у підшипниках, на тертя щіток об колектор і вентиляційних.

Втрати в сталі складаються із втрат на гістерезис і вихрові струми.

Тому що неврахування втрат у сталі, механічних і додаткових втрат у процесі розгону до виходу на природну характеристику повного збудження здатний змінити витрата енергії на тягу не більше ніж на 3% (при реально очікуваних технічних швидкостях), а їхній наближений облік у цьому діапазоні

швидкостей не може дати відчутних погрешностей, припустимо враховувати залежність втрат у сталі й механічних втратах від швидкості руху квадратичною параболою:

$$\Delta P'_{\text{ст}} + \Delta P'_{\text{мех}} = \frac{\Delta P_{\text{стп}} + \Delta P_{\text{мехп}}}{v_n^2} v^2 \quad (3.4)$$

де $\Delta P'_{\text{ст}}$, $\Delta P'_{\text{хуτρο}}$ – втрати при деякій швидкості $v < v_n$;

$\Delta P_{\text{стп}}$, $\Delta P_{\text{хуτροп}}$ – втрати при швидкості v_n .

При використанні для пуску тягових машин імпульсного регулятора напруги із силового кола вагона пускові резистори виключаються. Однак це не означає, що втрати при пуску зменшилися на значення втрат у пускових резисторах. Тиристорно-імпульсний регулятор не є ідеальним перетворювачем, що не має втрат. В елементах перетворювача (тиристорах, діодах, конденсаторах, реакторах) у процесі їхньої роботи виділяється енергія, що перетвориться в цих елементах у теплову. Для виключення неприпустимого нагрівання елементів перетворювача необхідно, щоб перетворювач мав гарну вентиляцію.

У розроблених для вагонів метрополітену перетворювачах число n робочих тиристорів включених послідовно, і зворотних діодів однаково, а число m паралельних вентилів вибирається таким чином, щоб середній струм через прилад не перевищував припустимого значення. У цьому випадку для спрощення розрахунків втрати в робочих тиристорів і зворотних діодів, обтічних струмом у плинні частини періоду, можна дорівняти до втрат в умовній групі напівпровідникових приладів, по яких протікає струм I протягом усього періоду. Число їх $m \cdot n$ дорівнює числу робочих тиристорів, а спадання напруги ΔU на приладі відповідає струму:

$$I = I_{\text{я порівн}} / m \quad (3.5)$$

Падіння напруги на тиристорах ТЛ200, ТЛ171-320, ТБ200, що працюють із припустимими значеннями струмів при навколишньому охолодженні, $\Delta U \approx 0,8\text{В}$ и незначно відрізняється від спадання напруги на діодах, які працюють із тими ж струмами.

Втрати енергії в напівпровідникових елементах перетворювача за час пуску t_{Π} вагона:

$$\Delta A_V = k_d n \Delta U I_{я} \text{ порівн } t_{\Pi}, \quad (3.6)$$

де k_d — коефіцієнт, що враховуються комутаційні втрати;

$$k_d = 1,2 \div 1,3.$$

Втрати в інших елементах перетворювача визначаються в такий спосіб. Резистори, шунтувальні послідовно включені напівпровідникові прилади. Використовуються для забезпечення рівномірного розподілу напруги між цими вентилями й обтікаються струмом у моменти часу, коли напівпровідникові прилади не проводять струм. Втрати енергії в резисторах:

$$\Delta A_R = \frac{m}{n} U^2 \frac{t_n}{R}, \quad (3.7)$$

де R - опір резистора, шунтуючого один вентиль.

3.3 Реостатно-контакторне керування

3.3.1. Реостатний пуск

При включеному в коло обмоток машин послідовного збудження пусковому резисторі напруга на затисках однієї тягової машини обмежується значенням

$$U_{\partial в} = (U - I_{я} R_n) / m, \quad (3.8)$$

де R_n — опір пускового резистора.

З виразів витікає, що для виконання умови $I_{я} = I_{я \text{ уст}}$ опір пускового резистора необхідно лінійно зменшувати у міру збільшення частоти обертання

якоря тягової машини відповідно до виразу

$$R_{\partial\partial} = \frac{U - C\Phi\omega t}{I_{яуст}} - m\Sigma R_{я}, \quad (3.9)$$

де C — постійний коефіцієнт; $C = C_E \mu / (3,6\pi D)$.

На існуючих вагонах опір пускового резистора регулюють ступінчасто. Для цієї мети пусковий резистор розбивають на секції, які перемикаються в процесі пуску. Ступінчастий пуск характеризується коливаннями пускового струму, тягового зусилля і прискорення при постійності середнього значення пускового струму $I_{я\text{ср}}$.

Ці коливання оцінюються коефіцієнтами нерівномірності по струму і силі тяги:

$$k_i = (I_{я\text{max}} - I_{я\text{min}}) / (2I_{я\text{ср}}) \text{ і } k_F = (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) / (2F_{\text{ср}}), \quad (3.10)$$

де $I_{я\text{max}}$, $I_{я\text{min}}$ і F_{max} , F_{min} — максимальні і мінімальні значення струмів в обмотках якорів тягових машин і сил тяги при пуску.

Середня сила тяги тим більше, чим менше коефіцієнт k_F . Для існуючих вагонів коефіцієнт нерівномірності по струму складає $k_i = 0,08 \div 0,085$ при числі ступенів опору пускового резистора 28–30. Значення $I_{я\text{max}}$ і F_{max} лімітуються умовами зчеплення коліс вагону з рейками.

Для перемикання секцій пускового резистора на вагонах метрополітену використовують реостатний контролер, що є контактним апаратом з відносно складною технологією виготовлення. З метою спрощення технології і підвищення надійності, режиму пуску для регулювання опору пускового резистора може бути використаний тиристорний реостатний контролер, в якому роль силових контактів виконують тиристори.

Тиристори VS1 — VS6 (рис. 3.1) включаються по сигналах, що поступають від системи управління.

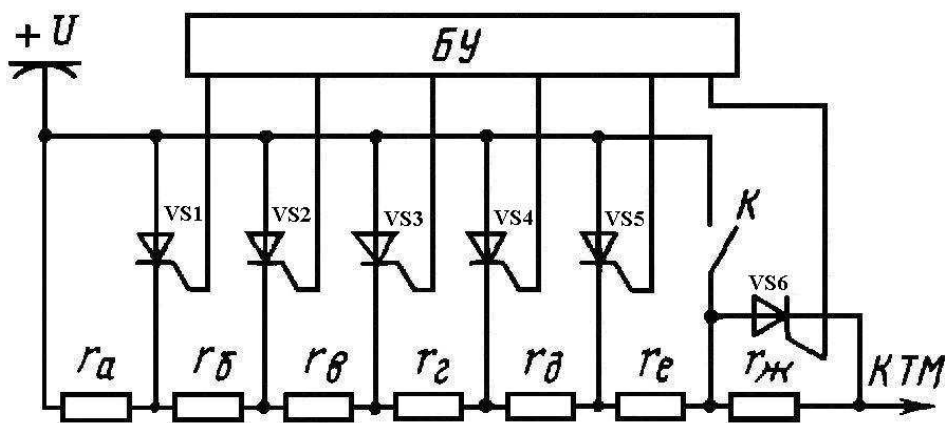


Рис. 3.1 – Схема безконтактного регулювання опору пускового резистора

При використуванні тиристорного реостатного контролера, наприклад, 14 ступенів опору реалізуються за допомогою шести тиристорів і одного контактора. Тиристорний реостатний контролер не має частин, що обертаються, простий у виготовленні і має високу надійність, оскільки використання контактних елементів зведене до мінімуму. Пусковий резистор розбитий на дві секції, одна з яких є регульованою. Паралельно окремим частинам регульованої секції включені тиристори $VS1 — VS5$. Паралельно нерегульованій секції включений тиристор $VS6$. Нерегульована секція має дещо більший опір, ніж регульована:

$$r_a + r_б + r_в + r_г + r_д + r_е < r_{ж} \quad (3.11)$$

У міру включення тиристорів $VS1 — VS5$ опір регульованої секції зменшується. Для повного виключення цієї секції необхідно включити контактор K . В цьому випадку опір пускового резистора буде рівний опору нерегульованої секції, тобто одержано сім ступенів регулювання опору. Подальші ступені від 8-й до 14-й реалізуються завдяки повторному використуванню тиристорів $VS1—VS5$. При включенні контактора струм через тиристори $VS1—VS5$ стає менше струму утримання, оскільки в загальному колі цих тиристорів включений ступінь $r_е$ і практично весь струм обмоток якорів тягових машин замикається через силовий контакт контактора, що забезпечує необхідні умови для відновлення замикаючих властивостей тиристорів $VS1—VS5$ за час включеного стану контактора.

По сигналу від системи управління БУ походить одночасне включення тиристора V6 і виключення контактора К. Так як опір нерегульованої секції пускового резистора дещо більше, ніж регульованої, той результуючий опір пускового резистора зменшується на розрахункову величину, необхідну для підтримки струму в обмотках якорів на заданому рівні. Надалі шляхом послідовного включення тиристорів VI–V5 і контактора К опір пускового резистора зменшується до нуля.

3.3.2 Реостатне гальмування

На експлуатованих вагонах метрополітену застосовується реостатне гальмування, при якому тягові машини переводяться в режим генератора і підключаються до гальмівних резисторів. У резисторах розсівається електрична енергія, яку виробляють тягові машини, перетворюючи кінетичну енергію вагону, запасену в процесі розгону.

На вагонах метрополітену потужність тягових машин при переході від тягового режиму до гальмівного форсується практично удвічі. Це звичайно здійснюється завдяки збільшенню е.р.с. тягових машин при переході до гальмівного режиму при практичному збереженні струму $I_{я\text{уст}}$ у обмотках якорів. Для тягових машин номінальна напруга в тяговому режимі 375В, а в гальмівному –750В, причому ізоляція тягових машин по відношенню до корпусу розрахована на напругу 750В.

Гальмівна сила, що розвивається тяговою машиною на колі коліс вагону,

$$B = \frac{C_E \mu}{\eta_n \pi D} \Phi I_{ям} + \frac{3.6 \Delta P_m}{\eta_n \nu}. \quad (3.12)$$

В процесі гальмування під дією електромагнітної гальмівної сили B і сил опору руху швидкість вагону і частота обертання якорів двигунів зменшуються, отже, зменшуються е.р.с. і струм тягової машини

$$I_{ям} = C_E \Phi \nu \mu / [(\sum R_{я} + R_m) 3.6 \pi D] \quad (3.13)$$

Для збереження ефективності гальмування у міру зменшення швидкості ступінчасто зменшують опір гальмівного резистора, шунтуючи секції цього резистора контактами реостатного контролера.

Процес гальмування стосовно вагонів метрополітену можна умовно розділити на три етапи. Перший етап — гальмування в зоні високих швидкостей з обмеженням гальмівного струму за умов комутаційної і потенційної стійкості і максимальної напруги на тяговій машині шляхом ослаблення збудження машин при максимальному опорі гальмівного резистора. Другий етап — гальмування в зоні середніх і низьких швидкостей з реалізацією близької до граничної гальмівної сили, обмеженої умовами зчеплення колеса з рейками, шляхом підтримки постійним середнього струму обмоток якорів тягових машин ступінчастою зміною опору гальмівного резистора при $\beta = 1$. Третій етап — гальмування в зоні мінімальних швидкостей, при яких автоматична підтримка гальмівного зусилля неможлива, оскільки $R_m = 0$ і $\beta = 1$. На цьому етапі у міру зниження швидкості вагону відбувається зменшення струму обмоток якорів машини і гальмівної сили. Для збереження ефективності гальмування на цьому етапі здійснюється заміщення електричного гальмування пневматичним. На існуючих вагонах третій етап гальмування настає при швидкостях 10—12 км/год.

Для розширення діапазону швидкостей початку гальмування на вагоні Є застосована обмотка підмагнічування, що дозволяє забезпечити самозбудження машин при менших швидкостях початку гальмування, ніж на вагонах Г і Д, і підвищити ефективність електричного гальма. Для забезпечення стійкої роботи тягових машин в режимі гальмування їх включають по циклічній схемі. При цьому обмотки якорів однієї групи тягових машин безпосередньо пов'язані з обмотками збудження іншої групи тягових машин, що дозволяє забезпечити вирівнювання навантажень або струмів в обмотках якорів в цих групах. У гальмівному режимі перемикання схеми з'єднання обмоток тягових машин не виробляється. Регулювання опору R_m здійснюється за допомогою реостатного контролера так само, як і в режимі тяги.

Для фіксації максимального потенціалу тягової машини по відношенню до корпусу на рівні потенціалу контактної рейки по відношенню - до ходової рейки в гальмівному режимі заземляють середню крапку між обмотками якорів однієї з груп тягових машин. В цьому випадку будь-яка точка силового кола по

відношенню до корпусу тягової машини матиме потенціал, що не перевищує максимальної напруги на одній тяговій машині, що є допустимим.

Реостатно-контакторне управління тяговими машинами використовується на всіх існуючих вітчизняних вагонах метрополітену. При цій системі управління для реалізації розглянутих вище режимів потрібне велике число силових контактів, а отже, і спеціальних апаратів, таких, як реостатний контролер, гальмівний перемикач, перемикач положень, реверс і лінійні контактори. Наявність великого числа контактних елементів як в силовому ланцюзі, так і в колах управління вагоном обумовлює порівняно низькі показники надійності вагонів метрополітену, що є основним недоліком реостатно-контакторного управління тяговими машинами. До інших недоліків слід віднести: наявність втрат в пускогальмових резисторах, низькі тягові зусилля в зоні високих швидкостей, неможливість реалізації рекуперативного гальмування, складність забезпечення комфорту перевезень пасажирів і т.п.

3.4 Схема силових кіл вагонів 81.714

Параметри і технічні характеристики вагонів 81.714, приведені нижче. Для реалізації вказаних технічних характеристик на кожному вагоні 81.714 встановлені чотири тягові машини ДК-П7А.

Регулювання струмів обмоток якорів і збудження тягових машин в тяговому і гальмівному режимах здійснюють відповідно до пускогальмівної діаграми. При гальмуванні в діапазоні швидкостей від 90 до 65 км/год регулювання струмів в обмотках збудження тягових машин забезпечують за допомогою тиристорних імпульсних регуляторів. Застосування тиристорних регуляторів в цьому діапазоні швидкостей викликане прагненням максимально скоротити гальмівні шляхи вагону, оскільки при швидкостях 90—65 км/год тягові машини працюють в найбільш напружених режимах. Тому необхідно точно, плавно, а значить, автоматично підтримувати струми і напруги на обмотках якорів, а також струми обмоток збудження на рівнях, гранично допустимих для тягових машин ДК-Н7А. Використовування тиристорних регуляторів дозволяє повністю автоматизувати процес електричного гальмування і значно скоротити гальмівні шляхи вагонів.

Застосування тиристорних регуляторів струму збудження тільки в режимах гальмування викликане тією обставиною, що при їх використуванні для регулювання струмів в обмотках збудження в режимах тяги виникають пульсації струмів в обмотках якорів. Ці пульсації надають дію на рейкові кола метрополітену і за певних умов можуть викликати помилкове спрацювання пристроїв АРС, які одержують сигнали по рейкових ланцюгах.

3.4.1 Розрахунок головних тиристорів

Головні тиристири VS8 (VS3). Рівномірний розподіл струмів між паралельними галузями забезпечується дільниками-резисторами, опір кожного з яких $R = 0,012 \text{ Ом}$. Результати обробки осцилограм показують, що максимальна швидкість зміни напруги на тиристорах VS8 у цих режимах не перевищує 3 В/мкс , час додатка зворотної напруги в процесі вимикання тиристора при середньому струмі в колі тягових двигунів 400 А становить не менш 125 мкс , максимальна напруга на тиристорах VS8 у всіх режимах перевищує напруга в контактній мережі. У режимах тяги й рекуперативного гальмування після вимикання діода VD8, чому відповідає закінчення дозаряду комутуючого конденсатора, напруга на тиристорах VS8 зменшується до максимальній, рівного напрузі на комутуючому конденсаторі й реакторі в момент закінчення дозаряду, до напруги на фільтровому конденсаторі, що незначно відрізняється від напруги в контактній рейці.

У режимі реостатного гальмування в порівнянні з іншими режимами максимальна напруга на тиристорах збільшується приблизно в 1,5 рази і становить 1650 В . Значення цієї напруги визначається спаданням напруги на регульованій частині R5 гальмового резистора ($R_5 = 3,4 \text{ Ом}$; індуктивність цього резистора $L_{R5} = 100 \div 150 \text{ мкГн}$) у момент закінчення заряду комутуючого конденсатора. Максимальна швидкість зміни струму при включенні головних тиристорів не перевищує 4 А/мкс .

При умовному холостому ході й куті регулювання $\alpha = 1,2^0$ максимальне значення випрямленої напруги на виході перетворювача $E_{d0} = 630 \text{ В}$. Активний опір навантаження $r_n = 3,5 \text{ Ом}$. Внутрішній опір перетворювача $r_{в..п} = 1 \text{ Ом}$. Максимальне значення випрямленого струму в навантаженні $I_{d \text{ макс}} = 400 \text{ А}$. Температура навколишнього середовища $t_{o.c} = 20^\circ \text{C}$.

Рішення. Індуктивність обмотки збудження електричної машини досить велика, можна вважати, що струм у навантаженні буде безперервним. У цьому випадку початковий кут регулювання перетворювача може бути визначений з рівняння:

$$E_{do} \cos \alpha = I_{d \text{ макс}}(r_n + r_{в..n}), \quad (3.14)$$

звідки

$$\alpha = \arccos \frac{I_{d \text{ макс}}(r_n + r_{в..п})}{E_{do}}; \quad (3.15)$$

$$\alpha = \arccos \frac{800 \cdot (3,5 + 1)}{630} = 1,2$$

Середнє значення струму, що протікає через тиристор:

$$I_{\alpha \text{ макс}} = \frac{I_{d \text{ макс}}}{2}; \quad (3.16)$$

$$I_{\alpha \text{ макс}} = \frac{800}{2} = 400 \text{ А}$$

Виходячи з отриманого значення $I_{\alpha \text{ макс}}$, можна вибрати тиристор типу ТЛ2-200, що при наявності радіатора із природним охолодженням дозволяє пропускати струм 400А.

Визначимо припустимі втрати в тиристорі при роботі його в класифікаційній схемі випрямлення на активне навантаження з кутом регулювання $\alpha = 1,2$, $I_{\alpha \text{ порівн}} = I_{\text{ан}} = 400 \text{ А}$:

$$\Delta P_{\text{кл}} = U_o I_{\text{аср}} + k_{\phi}^2 I_{\text{аср}}^2 r_D; \quad (3.17)$$

$$\Delta P_{\text{кл}} = 550 \cdot 200 + 1,57^2 \cdot 20^2 \cdot 0,02 = 628 \text{ Вт.}$$

Форма струму, що проходить через тиристор у розглянутій схемі перетворювача, що працює на обмотку збудження електричної машини може бути прийнята прямокутною. У цьому випадку коефіцієнт форми струму

$$k_{\phi L} = \frac{I_a}{I_{acp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_d^2 d(\omega t)}}{0.5 I_d}; \quad (3.18)$$

$$k_{\phi L} = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1,41.$$

Втрати в тиристорі розглянутої схеми

$$\Delta P_L = 600 \cdot 200 + 1,41^2 \cdot 5^2 \cdot 0,02 = 590 \text{ Вт}$$

Оскільки $\Delta P_L < \Delta P_{кл}$, то обраний тиристор забезпечує проходження струму, заданого умовами завдання.

Вимір напруги на окремих тиристорах показали, що використовувані R-C і R-кола забезпечують рівномірний розподіл напруги між трьома послідовно включеними тиристорами. Максимальна напруга на одному тиристорі в режимі реостатного гальмування була приблизно 550В при рекомендованій напрузі на один тиристор 630В. Отже, головні тиристори мають запас по напрузі 80В на один прилад. На вагонах Еір максимальна уставка по струму при максимальній масі вантажу 20 т становить 400А.

При тривалій роботі перетворювача з коефіцієнтом заповнення, близьким до максимального, середній струм через один працюючий тиристор становить 85—90А. Отже, головні тиристори обрані з невеликим запасом по струму, так як рекомендоване значення струму для тиристора ТЛ2-200 при швидкості охолоджувального повітря через охолоджувачі 1 — 1,5 м/с дорівнює 90А.

3.4.2 Допоміжні тиристори

Рівномірний розподіл струмів між паралельними галузями забезпечується індуктивними дільниками. Результати обробки осцилограм показують, що максимальні напруги на тиристорах VS7 (VS4) у всіх трьох режимах відрізняються незначно (1590—1800В) і приблизно вдвічі перевищують

напругу в контактній мережі; максимальна швидкість наростання прямої напруги не перевищує 4 В/мкс, час додатка зворотної напруги при середньому струмі в ланцюзі навантаження 400А становить приблизно 185мкс.

При вимиканні тиристорів VS7 (VS4) до них короткочасно прикладається зворотна напруга близько 1000В, рівна спаданню напруги на реакторі L9 (L4), що включений послідовно з діодами VD8 (VD5) для обмеження швидкості наростання прямої напруги на тиристорах VS7 (VS4) у режимі роботи перетворювача з максимальним коефіцієнтом заповнення, коли можливе включення головних тиристорів у процесі дозаряду комутуючого конденсатора. Після насичення реактора L9 до допоміжних тиристорів на протязі 55мкс прикладається зворотна напруга, рівна спаданню напруги на тиристорах VS8 (VS3), діодах VD8 (VD5) і сполучних проводах, що становить 50—60В.

На підставі отриманого значення $I_{d \text{ макс}}$ вибираємо силовий тиристор типу ВКУ-10, що забезпечує протікання середнього значення струму 1,5А при природному охолодженні без радіатора. Класифікаційне спадання напруги $U_k = 0,8В$.

Часу, що розсіює на тиристорі за інтервал, Т потужність :

$$\Delta P = \frac{1}{T} \int_0^T i u dt. \quad (3.19)$$

Відомо, що втрати в тиристорі підрозділяються на основні й додаткові.

Основні обумовлені проходженням основного струму через структуру тиристора, а додаткові викликані втратами в ланцюзі керування, втратами від прямого й зворотного струмів витоку й комутаційних втрат.

У нормальних умовах додаткові втрати становлять $\sim 5 \div 10\%$ від основних.

Миттєві значення i і u для синусоїдального струму можна записати в наступному виді:

$$I = I_m \sin \omega t, \quad (3.20)$$

$$U = U_o + r_d i, \quad (3.21)$$

де U_o – напруга випрямлення вольт-амперної характеристики тиристора, знятої на постійному струмі;

r_d – динамічний опір тиристора.

У загальному випадку, якщо тиристор відкривається при куті регулювання α і має кут провідності β , то середнє значення основних втрат:

$$\begin{aligned}\Delta P &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\beta} (U_o + r_D I_m \sin \omega t) I_m \sin \omega t d(\omega t) = \\ &= \frac{I_m}{2\pi} \left\{ U_o [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + r_D \frac{I_m}{2} \left[\beta + \frac{1}{2} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} \sin 2(\alpha + \beta) \right] \right\} = \\ &= U_o I_{\text{аср}} + r_D I_a^2, \quad (3.22)\end{aligned}$$

де $I_{\text{аср}} = \frac{I_m}{2\pi} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)]$ – середнє значення, що проходить через тиристор;

$$\begin{aligned}I_a &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\beta} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \\ &= I_m \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \sqrt{2\beta + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \beta)} \quad (3.23)\end{aligned}$$

де I_a – діюче значення струму, що проходить через тиристор.

Для розрахунків ΔP використовуємо формулу:

$$\begin{aligned}\Delta P &= U_o I_{\text{аср}} + k_{\phi}^2 I_{\text{аср}}^2 r_D, \quad (3.24) \\ \text{де } k_{\phi} &= \frac{I_a}{I_{\text{аср}}} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{2\beta + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \beta)}}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)}} \text{ – коефіцієнт форми струму.}\end{aligned}$$

На підставі наведеного рівняння можна визначити потужність, що розсіює в обраному тиристорі при проходженні через нього максимального струму $I_{\alpha \text{ макс}} = 400 \text{ А}$.

Для розглянутого прикладу $\alpha = 1,3$, $\beta = \pi$, тоді $k_{\phi} = \frac{\pi}{2} = 1,57$.

На жаль, у паспортних даних на тиристорі не вказується величина U_o і r_d . З достатнім ступенем точності для практичних розрахунків ці значення можна визначити за допомогою рівнянь:

$$U_o \approx (1,35 \div 1,55) U_K; \quad (3.25)$$

$$U_o = 2,41 \cdot 350 = 843B;$$

$$R_D \approx \frac{(0,2 \div 0,3)U_K}{I_{T.H}}; \quad (3.26)$$

$$r_D = \frac{0,25 \cdot 350}{400} = 0,02 \text{ Ом},$$

де $I_{T.H}$ – номінальний струм тиристора, при якому в каталозі вказується U_K .

Клас вентиля визначається максимальною зворотною напругою, що при зневазі внутрішнім опором провідний струм тиристора визначається співвідношенням:

$$U_{в.макс} = \pi E_{do}; \quad (3.27)$$

$$U_{в.макс} = 3,14 \cdot 310 = 973B.$$

З огляду на, що при комутаційних режимах захист не може повністю усунути перенапруги, тиристор необхідно вибрати на трохи більшу напругу:

$$U'_{в.макс} = k \cdot U_{в.макс}; \quad (3.28)$$

$$U'_{в.макс} = 1,25 \cdot 973 = 1216B,$$

де k – коефіцієнт, обумовлений видом захисту і її параметрів; для більшості схем k може бути прийнятий рівним 1,25.

Після вимикання головних тиристорів до тиристорів VS7 (VS4) прикладається стрибком напруга близько 1000В, що по мірі перезаряду комутуючого конденсатора за 130мкс зменшується до нуля. На осцилограмі напруги на VS7 (VS4) можна виділити три характерних ділянки зміни напруги, пов'язаних із зарядом-розрядом комутуючого конденсатора: на першій ділянці напруга змінюється практично лінійно від 1000 до 860В, чому відповідає перезаряд комутуючого конденсатора постійним струмом по колу тягових машин; на другій ділянці напруга збільшується незначно до + 1100В, у цей час

відбувається дозаряд комутуючого конденсатора; на третій ділянці напруга на допоміжних тиристорах різко збільшується до +1727В, при цьому закінчується дозаряд, вимикається діод VD8 (VD5), до тиристора VS7 (VS4) прикладена напруга комутуючого конденсатора.

Швидкість зміни струму через тиристори у всіх режимах, за виключенням маневрового, становить не більше 7,5 А/мкс. У маневровому режимі головні тиристори відключені, а регулювання здійснюється тільки завдяки використанню допоміжних тиристорів, при включенні яких струм наростає по двох коло: контактна мережа M1 (M2) — M3 (M4) — L7 (L2) — VS7 (VS4) — VD8 (VD5)—L6 (L5)—ЗУМ і C3 (C2)—VS7 (VS4) — L8 (L3). У цьому випадку di/dt становить 10А/мкс. Вимір напруги на окремих тиристорах показав, що між трьома послідовно включеними тиристорами напруга ділиться рівномірно. Найбільша напруга на одному тиристорі становить 600В в режимі реостатного гальмування, тобто по напрузі є невеликий запас.

Амплітудне значення струму перезаряду через допоміжні тиристори дорівнює 161А, розрахункове значення струму через допоміжний тиристор 81А.

3.4.3 Режим гальмування

У режимі гальмування тягові машини вагону сполучені по перехресній мостовій схемі. У діагональ моста, утвореного обмотками якорів і обмотками збудження, включений гальмівний резистор. По ньому протікає сумарний струм обмоток якорів обох груп тягових машин. Як видно з рис. 3.3, струм обмоток якорів машин першої групи протікає по обмотках збудження машин другої групи, а в контурі кола, що містить обмотки збудження машин першої групи, протікає струм обмоток якорів машин другої групи. Це так зване перехресне з'єднання обмоток машин в режимі електричного гальмування забезпечує електричну стійкість схеми.

Послідовність роботи схеми така, що спочатку в зоні високих швидкостей гальмівні резистори повністю введені, а тиристорні регулятори спочатку ослабляють, а потім підсилюють збудження тягових машин, регулюючи струми $I_{ш1}$ і $I_{ш2}$. Процес регулювання вказаних струмів здійснюється по сигналу датчика струму якоря (ДСЯ) і закінчується при швидкостях 65—68 км/год, коли розмикаються контакти КШ1, КШ2. Далі в роботу вступає реостатний

контролер, послідовне замикання контактів якого забезпечує ступінчасте виведення гальмівних резисторів. Ефективне електричне гальмування зберігається до швидкостей 5—8 км/год, а потім в дію вступає пневматичне гальмо.

Розглянемо роботу тиристорного регулятора струму збудження РТ-300/300А. У початковому стані комутуючі конденсатори С27, С28 заряджені з полярністю, показаною на рис. 3.3.

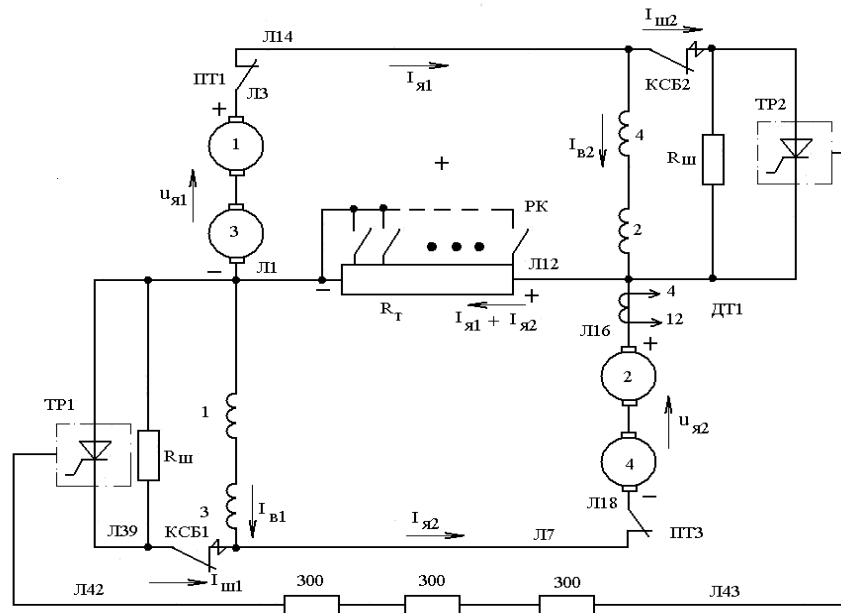


Рис. 3.3 – Схема силових кіл вагонів 81.714 і 81.717 в режимі електричного гальмування

Початковий заряд конденсаторів забезпечується завдяки падінню напруги на ділянці з п'яти резисторів опором по 300 Ом, включених між дротами Л40 і Л39. Між цими дротами існує різниця потенціалів, зразково рівна сумі напруг на обмотках якорів двох тягових машин за вирахуванням падіння напруги на двох обмотках збудження. Ця різниця потенціалів складає близько 1000 В. Під її дією по ділянці, включеному між дротами Л40 і Л39, протікає струм ділянки I_d . Цей струм створює падіння напруги близько 200 В на резисторі, включеному між дротами Л40 і Л43. Робота тиристорного регулятора починається з того, що імпульси з коло управління поступають на управляючий електрод допоміжного тиристора VS6. Відмикання його приводить до появи зарядного струму в колі комутуючих конденсаторів С27, С28 під дією падіння напруги 200 В на резисторі, включеному між дротами Л40 і Л43. Комутуючі конденсатори заряджаються до напруги 200 В струмом, що протікає по колу: Л40, Т6, Л3, С27 (С28), резистор 0,02 Ом, діод VD12 (VD11), резистор 270 Ом, Л43.

Імпульси управління на головні тиристори VS3, VS4 поступають одночасно. При їх відмиканні тиристорний регулятор шунтує обмотки збудження 4, 2 і струм в них починає зменшуватися, оскільки вся велика частка струму обмоток якорів $I_{я1}$ починає відгалужуватися в коло тиристорів VS3, VS4. Таким чином, струм $I_{ш2}$ зростає, а струм $I_{в2}$ зменшується. Зменшенню струму $I_{в2}$ при відкритих тиристорах VS3, VS4 сприяє та обставина, що сумарний активний опір кола вказаних тиристорів з урахуванням чотирьох послідовно-паралельно включених резисторів по 0,02Ом складає 0,02Ом, тоді як сумарний опір двох обмоток збудження в 5 разів більше і складає близько 0,1Ом.

Відмикання тиристорів VS3, VS4 приводить також до перезаряду комутуючих конденсаторів C27, C28 до зворотної полярності по колу C27 (C28), L4, VD9, VS4 (VS3), C27 (C28). Перезаряд носить коливальний і підготовчий характер і служить для забезпечення надалі замикання головних тиристорів VS3, VS4. Замикання обох головних тиристорів VS3, VS4 відбувається при відмиканні допоміжного тиристора VS6. Відмикання тиристора VS6 призводить до того, що паралельно кожному з головних тиристорів через комутуючий реактор L3 підключається комутуючий конденсатор. Під дією напруги на комутуючих конденсаторах C27, C28 в колі кожного з головних тиристорів починає протікати струм, направлений назустріч струму $I_{ш2}$, що протікав по тиристорах VS3, VS4 до моменту відмикання тиристора VS6. Струми конденсаторів C27, C28 поступово витісняють струми з головних тиристорів VS3, VS4, і вони починають відновлювати свої замикаючі властивості. Параметри комутуючих конденсаторів C27, C28 і комутуючого реактора L3 вибрані таким чином, що зворотна напруга до головних тиристорів VS3, VS4 прикладається протягом 150—200мкс, що достатнє для повного відновлення їх замикаючих властивостей.

У початковий момент замикання головних тиристорів VS3, VS4 струм $I_{ш2}$ витісняється з їх кола в коло тиристора VS6 і комутуючих конденсаторів C27, C28. Цим струмом комутуючі конденсатори заряджають до початкової полярності. У міру заряду конденсаторів струм $I_{ш2}$ поступово витісняється в коло шунтуючого резистора $R_{ш}$. Від протікання струму $I_{ш2}$ по резистору $R_{ш}$ на ньому виникає напруга від 100 до 200В. До цього значення заряджають комутуючі конденсатори C27, C28. Таким чином, один цикл роботи тиристорного регулятора закінчився і струм в ньому спочатку зріс до

максимального значення, а потім спав до нуля, витіснюючись в коло резистора $R_{ш}$. Оскільки опір резистора $R_{ш}$ набагато перевищує активний опір обмоток збудження, то струм з кола цього резистора поступово витісняється в коло обмоток збудження. Очевидно, що чим довше відкриті тиристори $VS3$, $VS4$, тим більше середнє значення струму $I_{ш2}$ і менше струм в обмотках збудження.

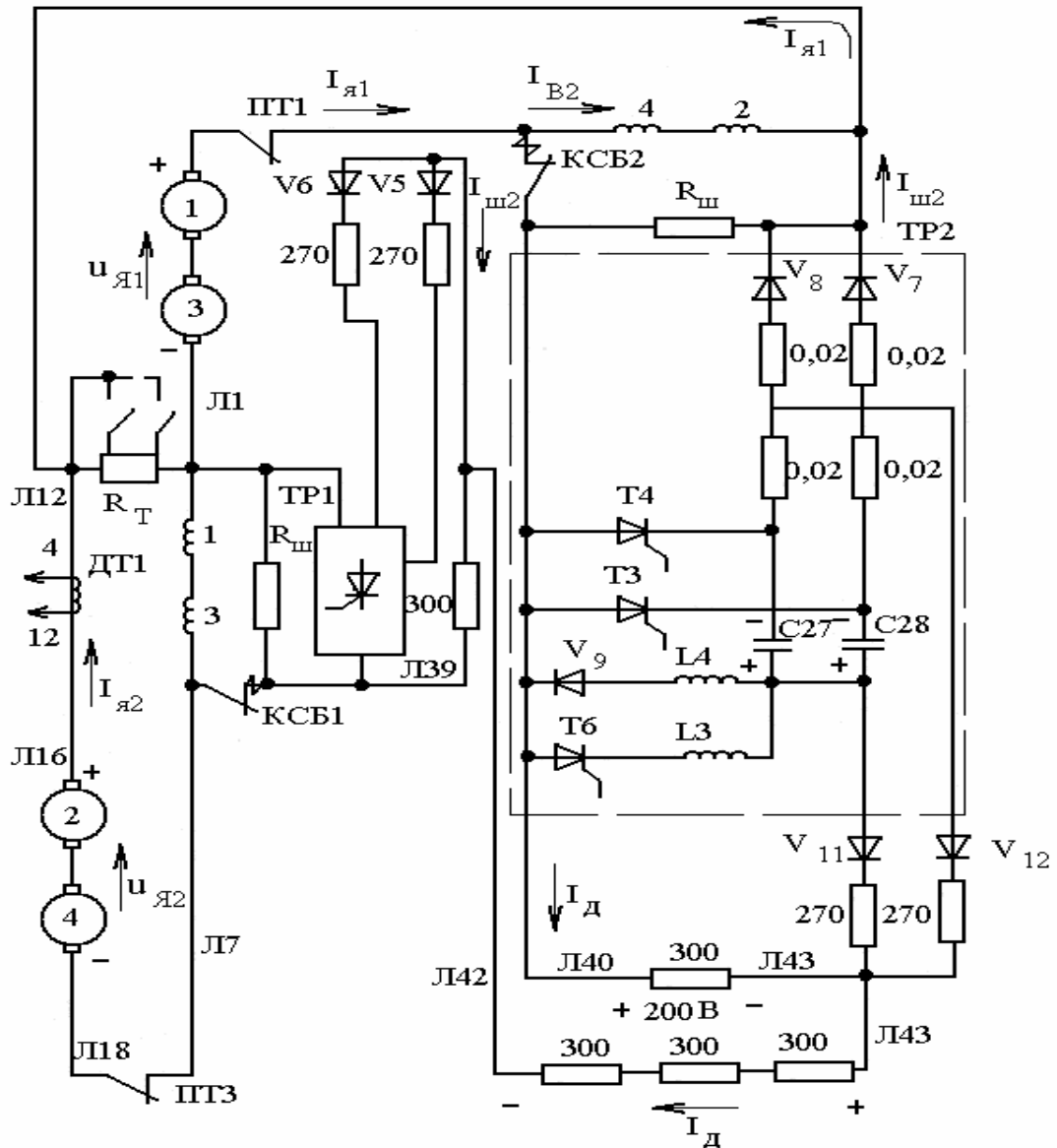


Рис. 3.4 – Принципова схема силових кіл регулятора струму збудження РТ-300

На рис. 3.5 приведені діаграми, що пояснюють роботу тиристорного регулятора. Управляючі імпульси I_y на тиристори VS3, VS4 і VS6 подаються по черзі з частотою 100Гц. Це значить, що період регулювання T складає 10000мкс. При струмі обмоток якорів $I_{я1}=350A$, струмі в обмотках збудження $I_{в2}=200A$ і струмі в шунтуючому колі $I_{ш2}=150A$ коефіцієнт ослаблення збудження $\beta = I_{в2}/I_{я1} = 0,57$.

Коли тиристори VS3, VS4 замкнуті, напруга на них досягає $U_T = I_{ш2}R_{ш} = 150V$. При відмиканні головних тиристорів VS3, VS4 за допомогою імпульсу, що поступив з кіл управління, напруга на них стає практично рівною нулю. В цей же час починається коливальний перезаряд комутуючих конденсаторів C27, C28 і напруга на їх обкладаннях $U_{ск}$ міняє знак на протилежний. Через втрати в контурі перезаряду конденсатори перезаряджаються з 150 до приблизно 125В.

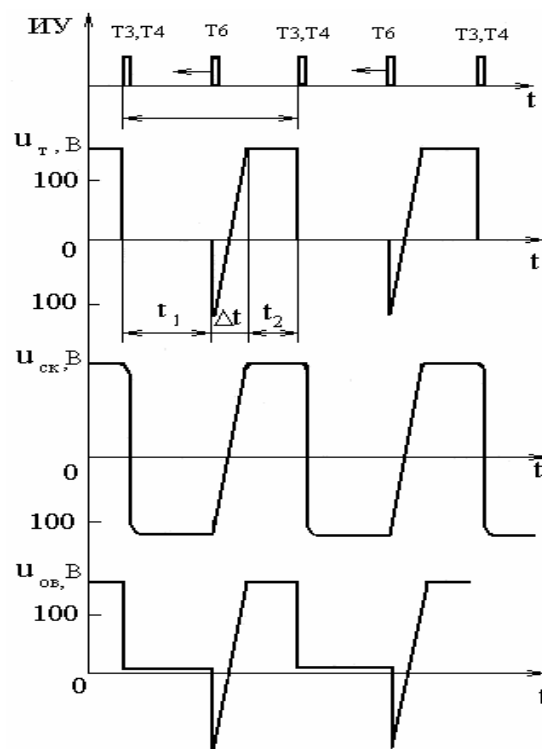


Рис. 3.5 – Діаграми напруг на елементах регулятора РТ-300 і обмотках збудження

Протягом часу t_1 тиристори VS3, VS4 відкриті і проводять струм в прямому напрямі. Тиристори VS3, VS4 шунтують обмотки збудження 4, 2 і тому напруга на них падає до значення, визначуваного падінням напруги на резисторах в колах діодів VD7, VD8. Це значення складає 3В. По закінченні часу t_1 з кіл управління поступає імпульс на управляючий перехід тиристора

VS6. При відмиканні тиристора VS6 створюється коло зворотного перезаряду комутуючих конденсаторів, прямий струм з тиристорів VS3, VS4 витісняється і до них у зворотному напрямі прикладається напруга комутуючих конденсаторів C27, C28. Оскільки обмотки збудження включені паралельно тиристорам VS3, VS4, то до них також прикладається напруга комутуючих конденсаторів у зворотному напрямі. Проте через велику індуктивність цих обмоток струм в них на відміну від тиристорів VS3, VS4 не уривається, а продовжує протікати в тому ж напрямі, тобто в напрямі, показаному стрілкою на рис. 3.5.

Струм $I_{\text{ш2}}$, витиснений з кола тиристорів VS3, VS4, переводиться в коло тиристора VS6 і комутуючих конденсаторів C27, C28, які перезаряджаються цим струмом до початкової полярності. Цей процес триває протягом періоду Δt (рис. 3.5). Після закінчення цього процесу протягом часу t_2 тиристорний регулятор не працює. Напруга на тиристорах VS3, VS4, на комутуючих конденсаторах C27, C28 і на обмотках збудження 4, 2 складає в цей відрізок часів 150В. Середнє за період значення струму в обмотках збудження визначається середнім значенням прикладеної до них напруги. Оскільки сумарний активний опір двох обмоток збудження складає 0,09 Ом, очевидно, що при струмі збудження 200А середнє за період T значення напруги на обмотках збудження буде 18В. Середня напруга на обмотках збудження визначається коефіцієнтом заповнення λ тиристорного регулятора: $\lambda = (t_1 + \Delta t) / T$.

В процесі роботи тиристорного регулятора λ змінюється від одиниці, коли тиристорний регулятор проводить струм при безперервно відкритих тиристорах VS3, VS4, до мінімального значення $\lambda_{\text{min}} = \Delta t / T$. Для отримання режиму повного збудження розмикається контакт КСБ2 і струм обмоток якорів стає рівним струму обмоток збудження. На цьому процес регулювання (посилення) збудження тягових машин закінчується.

Застосування перехресної схеми гальмування, яка забезпечує вирівнювання струмів обох груп тягових машин, дозволило використовувати один датчик струму ДС1 і одну загальну схему управління для двох тиристорних регуляторів струму збудження, встановлених на вагоні.

3.4.4 Кола керування

Вони формують і подають управляючі імпульси на головні і допоміжні тиристири обох тиристорних регуляторів вагону одночасно і з однаковим коефіцієнтом λ . Як видно з функціональної схеми (рис. 3.6), всі основні елементи кіл управління одержують живлення від блоку живлення БЖ. Останній складається із стабілізатора напруги, генератора прямокутних імпульсів і підсилювача. Напруга на БЖ подається безпосередньо від акумуляторної батареї (АБ) вагону. Тут напруга АБ(+75В) перетвориться в стабілізовану напругу двох рівнів: 12 і 24В. Стабілізована напруга 12В подається на малопотужний генератор прямокутних імпульсів, працюючий з постійною частотою 1000Гц.

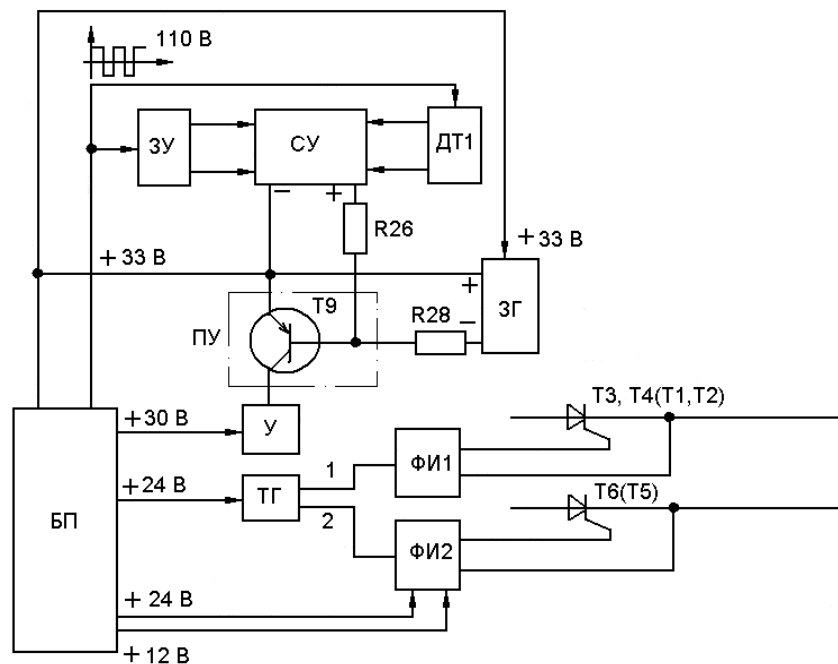


Рис. 3.6 – Функціональна схема системи управління тиристорними регуляторами струму збудження

Підсилювач малопотужних прямокутних імпульсів живляться стабілізованою напругою 24В. Вихід підсилювача підключений до багатообмоточного трансформатора, обмотки якого, таким чином, живляться змінною напругою прямокутної форми з частотою 1000Гц. До двох вихідних обмоток багатообмоточного трансформатора підключений випрямляч, на виході якого виходить постійна напруга 33В. Ця напруга діляником резистора ділиться на декілька підрівнів: 30, 27 і 24В. Ці напруги подаються на задаючий

генератор ЗГ, пороговий пристрій ПУ, підсилювач У і тригер ТГ. Формувачі імпульсів ФЕ живляться стабілізованою напругою 12 і 24 В безпосередньо від стабілізатора напруги. На обмотки датчика ДС1 струму обмоток якорів і на вхід задатчика уставок струму ЗУ від однієї з обмоток багатообмоточного трансформатора подається змінна напруга 110В прямокутній форми.

На порівнюючий пристрій СУ, виконане на транзисторі, поступають напруга датчика ДС1, пропорційне струму обмотки якоря, і напруга задатчика уставки ЗУ, пропорційне заданою уставкою струму. Різниця цих напруг через резистор R26 подається на вхід транзистора VT9. Сюди ж через резистор R28 поступає напруга задаючого генератора ЗГ, який є генератором пилоподібної напруги, виконаний на транзисторі. Транзистор VT9 виконує роль порогового пристрою. Якщо сума напруг, що поступили на його вхід, позитивна, то він відмикається, якщо негативна, то він знаходиться в замкнутому стані.

Частоту роботи всіх елементів кіл управління визначає задаючий генератор ЗГ, який перемикається з частотою 100Гц. Тому частота роботи силових тиристорів також складає 100Гц.

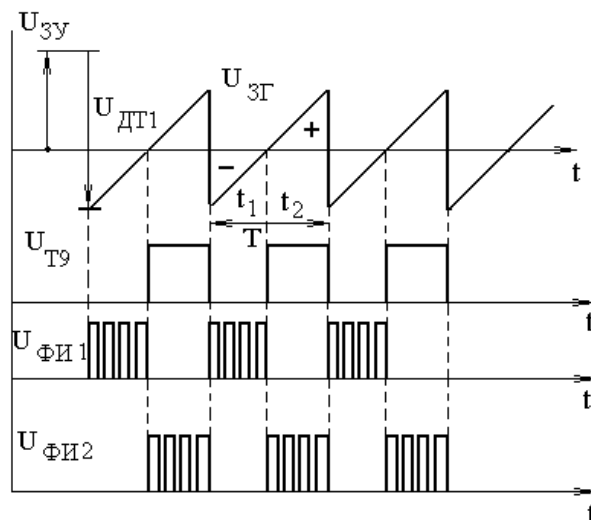


Рис. 3.7 – Діаграми напруг в схемі управління регулятором РТ-300

Як видно з рис. 3.7, в кожному періоді регулювання T сума напруг $u_{зу}$, $u_{дт1}$, і $u_{зг}$, що поступають на вхід транзистора VT9 (рис. 3.6) є негативною протягом часу t_1 (рис. 3.7) і позитивною протягом часу t_2 . Протягом часу t_2 транзистор VS9 знаходиться у відкритому стані і на його колекторі формується прямокутний імпульс напруги. Цей імпульс посилюється підсилювачем У і поступає на тригер ТГ. Коли транзистор VT9 відкритий, то на першому виході тригера ТГ так само, як і на виході транзистора VT9, формується прямокутний

імпульс з амплітудою 24 В. Цей імпульс утримує блокінг-генератор формувача імпульсів ФІ1. В замкнутому стані і тому він не працює. На другому виході тригера ТГ в цей період напруга рівна нулю. Тому блокінг-генератор формувача імпульсів ФІ2 працює в автоколивальному режимі і на його виході формуються короткі імпульси, що мають тривалість 70мкс і частоту повторення 1600Гц. В період часу t_1 транзистор VT9 замкнутий. В цей час тригер ТГ знаходиться в такому стані, що на його першому виході напруга рівна нулю, а на другому — 24В. Тому блокінг-генератор формувача ФІ2 загальмовано, а на виході формувача ФІ1 формуються імпульси, які поступають на управляючі електроди силових тиристорів VS1 — VS4 і відмикають їх. Силові тиристори VS1 — VS4 закриваються, коли в роботу вступає формувач ФІ2 і імпульси, формовані на його виході, відмикають допоміжні тиристори VS5, VS6.

4. ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

4.1 Призначення захисту

Значні відхилення величин напруги і струму від допустимих меж приводять до підвищеного зносу електроустаткування або до виходу його з ладу.

Для запобігання пошкодженням і надмірно швидкого зносу електроустаткування, а також для забезпечення безпеки пасажирів тягові двигуни, пускогенеруючу апаратуру, дроти і допоміжне електроустаткування захищають спеціальними апаратами. У разі виникнення в ТЕД або на якій-небудь ділянці кола пошкодження або аварії захисні апарати від'єднують пошкоджену ділянку або всю електроустаткування від мережі.

Електричне устаткування захищають від перевантажень, коротких замикань, підвищеної і надмірно зниженої напруги, перенапруження і струмів витоку. Крім того, на ЕРС встановлюють пристосування, що захищають радіоприйом від перешкод, що викликаються дією електроустаткування.

Під перевантаженням електричного кола мають на увазі величину струму, що перевищує максимально допустиму для елементів цього кола. Перевантаження силового кола можуть виникати через передчасне виключення окремих ступенів пускових або гальмівних опорів в результаті несправності автоматичної системи управління або неправильної дії водія при неавтоматичному управлінні.

Короткі замикання виникають при порушенні ізоляції між провідниками або струмоведучими деталями електричних апаратів і машин, а також при круговому вогні на колекторах тягових двигунів і допоміжних машин.

Перевантаження і коротке замикання приводять до перегріву обмоток ТЕД, апаратів, дротів і кабелів і при недостатній швидкодії захисту можуть викликати пошкодження окремих елементів електроустаткування і порушення нормальної комутації електродвигунів.

Перевантаження, що часто повторюються, погіршують комутацію електричних машин і прискорюють старіння ізоляції.

Підвищення напруги в контактній мережі або на затисках ТЕД понад допустиме значення може відбутися при рекуперативному гальмуванні, якщо споживання енергії в мережі недостатньо.

При ТЕД змішаного збудження в цьому випадку припиняється або різко ослабляється розмагнічуюча дія послідовної обмотки збудження, а при ТЕД послідовного збудження ослабляється дія стабілізуючого опору або стрічної обмотки збудження збудника.

Перенапруженням називають короткочасне або імпульсне підвищення напруги в живлячій мережі і в електроустаткуванні при грозових розрядах, атмосферних індукованих зарядах і комутаційних процесах.

На відміну від звичного підвищення напруги перенапруження, наприклад атмосферне, характеризується короткочасною, але дуже високою величиною, що іноді перевершує у декілька разів номінальна напруга.

Виникнення надмірної напруги може привести до пробою ізоляції елементів електроустаткуванні, порушенню нормальної комутації і до інших несправностей, які можуть привести до важких аварій.

Пониження напруги мережі порушує нормальну роботу електричних апаратів. Відновлення нормальної напруги після руху при зниженій напрузі без попереднього включення пускових опорів може викликати надмірне перевантаження і привести до кругового вогню на колекторах електродвигунів.

4.2 Захист від перевантажень і коротких замикань

Електроустаткуванню від перевантажень і коротких замикань захищають за допомогою автоматичних вимикачів, електромагнітних реле максимального струму, діючих на лінійні контактори, і плавких запобіжників.

Обмотку реле максимального струму (реле перевантаження) включають в коло, що захищається. Коли струм кола перевищує струм, на який відрегульовано реле, якір останнього притягується і своїми контактами вимикає підйомні котушки лінійних контакторів, а вони в свою чергу вимикають це коло.

Зворотне включення ланцюга не повинне бути мимовільним; воно повинне здійснюватися після підготовки водієм апаратів для повторного включення. На рис 4.1 показані схеми блокування реле перевантаження і лінійного контактора.

Цього може бути досягнуто або відповідною схемою з'єднань реле і інших апаратів, або утримуючою котушкою або механізмом реле, що заципує.

У останньому випадку відновлення механізму, що заципує, для повторного включення ланцюга відбувається за допомогою електромагніту, вмонтованого в реле. Коло живлення його котушки може включатися тільки в

нульовому положенні контроллера управління при натисненні кнопки повернення реле перевантаження.

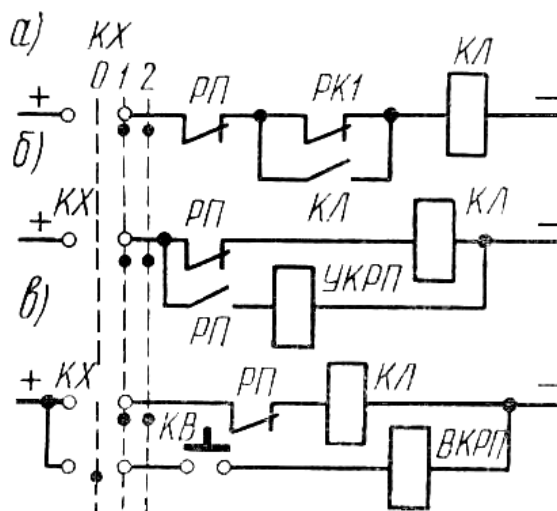


Рис. 4.1 – Схеми блокування реле перевантаження і лінійного контактора

На рис. 4.1 приведені деякі з можливих варіантів схем блокування реле перевантаження з лінійними контакторами, забезпечуючого виконання поставленої вимоги.

У схемі (рис. 4.1, а) підйомна котушка КЛ лінійного контактора одержує живлення при установці контроллера ходу КХ в одне з робочих положень 1 або 2 через розмикаючі контакти реле перевантаження РП і блок-контакти реостатного контроллера РК1, замкнуті тільки в першому положенні. Після включення лінійного контактора його замикаючими блок-контактами КЛ шунтуються контакти РК1, внаслідок чого зберігається ланцюг живлення КЛ в процесі обертання валу РК.

При перевантаженні спрацьовує реле перевантаження, розмикаються контактори РП і вимикається лінійний контактор. Після виключення КЛ якір реле перевантаження приймає початкове положення і контакти РП знову замикаються. Проте лінійний контактор не включиться, оскільки контакти РК1 і КЛ будуть розімкнені. Повернення реостатного контроллера в перше положення відбудеться тільки при положенні 0 контроллера ходу КХ. (Коло живлення приводу РК на схемі не показаний).

У схемі (рис. 4.1, б) реле перевантаження має утримуючу котушку УКРП. При спрацьовуванні реле перевантаження РП його розмикаючі блок-контакти вимикають коло живлення котушки лінійного контактора; одночасно з цим

замикаючі блок-контакти включають коло утримуючої котушки УКРП, за допомогою якої якір реле утримується в тому положенні, в якому він знаходився в результаті перевантаження. Реле повертається в початкове положення при установці контроллера ходу в положення 0, в якому утримуюча котушка вимикається.

У схемі (рис. 4.1, в) при спрацьовуванні реле перевантаження РП його контакти розмикаються і утримуються в розімкненому стані за допомогою механічної клямки. Для повернення реле в початкове положення необхідно поставити рукоятку контроллера ходу КХ в нульове положення і натиснути кнопку повернення. Тоді електромагніт повернення реле перевантаження ВК. РП звільнить клямку і контакти реле перевантаження під дією поворотної пружини повернуться в початкове положення.

За наявності декількох кіл ТЕД реле перевантаження встановлюють в кожне коло.

Для захисту від перевантажень і струмів коротких замикань окрім реле перевантажень, діючих на виключення лінійних контакторів, застосовують автоматичні вимикачі, встановлювані в загальному колі. Струм відключення автоматичних вимикачів звичайно встановлюють більшим, ніж струм відключення реле перевантаження, а їх час спрацьовування — менше сумарного часу спрацьовування реле перевантаження і виключення лінійних контакторів. Тому при коротких замиканнях звичайно спрацьовує автоматичний вимикач, а при поволі наростаючих перевантаженнях—реле перевантаження.

Допоміжні кола і кола управління звичайно захищають від перевантажень і коротких замикань плавкими запобіжниками.

4.3 Захист від надмірних підвищень і понижень напруги

Захист від надмірного підвищення напруги застосовують тільки на рухомому складі з рекуперативним гальмуванням. Надмірне підвищення напруги виникає під час рекуперативного гальмування при відключенні споживачів енергії в контактній мережі. Процес підвищення напруги па генераторі стрічно-змішаного збудження показаний на рис. 4.2, де 1 є залежністю $E (F_B)$ генератора при $U_T = \text{const}$, а 2 — падіння напруги в ланцюзі обмотки паралельного збудження від струму намагнічення цієї обмотки ($U_{ш} = I_{ш} R_{ш} = U_n$).

За наявності в контактній мережі споживачів енергії ЕРС E створюється під дією різниці МРС $F_B = I_{швш} - I_{твс}$ і рівна $E = U_{п} + I_{тдв}$. Якщо струм навантаження контактної мережі, що харчується тільки через випрямлячі, стає менше гальмівного струму I_T (струму рекуперації), то це викликає зниження останнього і збільшення F_B , E і $U_{п}$. При повній відсутності споживачів енергії $I_T = 0$ і $F_6 = I_{ш}W_{ш}$. Причому у міру зростання E (переміщення точки a по кривій 1 вгору) і, отже, зростання напруги контактної мережі $U_{п}$ відбувається збільшення струму $I_{ш}$ (переміщення точки b по кривій 1 вгору). Якщо при цьому не спрацює захист, то ЕРС досягне значення $E_{\text{Макс}}$ в крапці $в$.

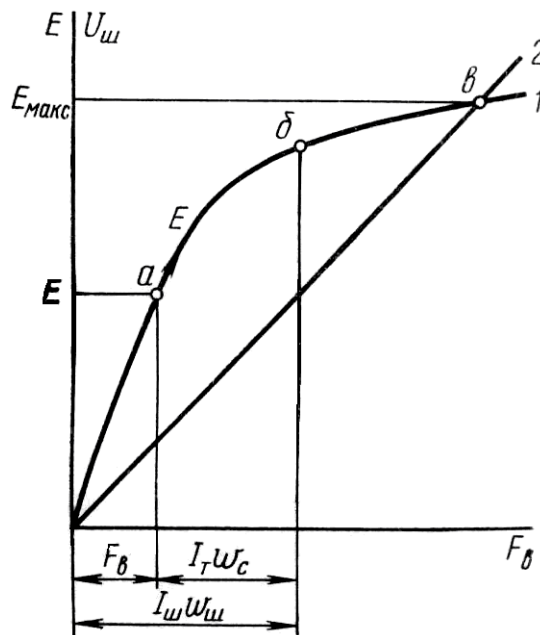


Рис. 4.2 – Графік підвищення ЕРС генераторів при зникненні навантаження

При високих швидкостях U_T значення $E_{\text{Макс}}$ може досягати величини, небезпечної для діелектричної міцності ізоляції і комутаційної стійкості тягових двигунів.

Захист від надмірного підвищення напруги здійснюють за допомогою електромагнітного реле максимальної напруги або автомата напруги.

Підйомну котушку реле максимальної напруги автомата напруги підключають до затисків тягового двигуна через додатковий опір з малим температурним коефіцієнтом, завдяки чому зменшується вплив змін температури на опір ланцюга і, отже, на напругу спрацьовування реле (реле спрацьовує при певних величинах МРС і струмі, що протікає через котушку).

Включення додаткового опору дає можливість, крім того, понизити напругу на котушці реле, що дозволяє виконати її з товщого дроту з меншим числом витків.

Звичайно при спрацьовуванні реле максимальної напруги його контакти замикають коло підйомної котушки контактора, що включає коло реостатного гальмування. Блок-контакти цього контактора потім вимикають коло лінійних контакторів, що відключають тягові двигуни від контактної мережі. За час спрацьовування реле і включення гальмівного контактора напруга на двигунах може досягти великої величини. Тому для прискорення процесу включення реостатного гальмування іноді реле максимальної напруги і гальмівний контактор об'єднують в загальний апарат — автомат напруги, час спрацьовування якого менше сумарного часу спрацьовування реле і контактора.

По своїй конструкції автомат напруги виконують як контактор з електромагнітним приводом, але з ретельнішим регулюванням магнітної системи, що дозволяє розрахувати його на достатньо стабільний струм спрацьовування.

При розмиканні кола паралельного збудження в обмотці збудження виникає ЕРС самоіндукції, яка може викликати значне перенапруження і пробій ізоляції. Для захисту від перенапруження паралельно до обмотки збудження під'єднують розрядний опір, сприяючий зниженню перенапруження.

Значне пониження напруги не представляє небезпеки для електроустаткування, якщо не брати до уваги підвищення тривалості роботи мотор-компресора і підвищену тривалість розряду батареї. Проте подальше відновлення напруги без попереднього включення пускового опору може викликати перевантаження і круговий вогонь на колекторах двигунів, який у важких випадках супроводжується перекиданнями дуги на корпус. Для захисту від подібних перевантажень на всіх видах електрорухомого складу ставлять реле мінімальної (нульової) напруги. Це реле підключають до напруги контактної мережі через додатковий опір, так само як і реле максимальної напруги.

При нормальній напрузі якір реле притягає, а при перерві живлення або надмірному пониженні напруги (звично менше 50% від номінального) якір реле відпадає і його контакти вимикають лінійні контактори. Крім того, подається світловий, а на тролейбусах ще і звуковий сигнали водію про відпадання якоря реле, тобто про відсутність або надмірне зниження напруги в контактній мережі.

При відновленні напруги в мережі контакти нульового реле замикаються, причому включення силового кола лінійними контакторами здійснюється у всіх схемах автоматичного управління тільки при повністю введених пускових опорах.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Єфремов И.С., Косарев Г.В. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование). Ч.2: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1981. – 248 с., ил.
2. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
3. Я.И. Гаврилов, В.А. Мнацаканов «Вагоны метро с импульсными преобразователями». «Транспорт», М.: - 1986 г.
4. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404 с.
5. Максимов А.Н. Городской электротранспорт: троллейбус. Учебник для нач. проф. образования / А.Н. Максимов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004 – 256 с.
6. Добровольская Э.М. Электропоезда метрополитена: Учебник для нач. проф. образования. – М.: ИРПО: М.: Изд. центр «Академия», 2003. – 320 с.
7. Преобразовательная тех. в электроприводе и электрическом транспорте: Тематический сб./ ред.: И.С. Ефремов. и В.А. Лабунцов. – М. 1980 – 140 с. Ил. - /труды / мош. Энергетич. ин.-т
8. Ю.С. Фролов, Д.М. Голицынский, А.П. Ледяев. Метрополитены. Ученик для вузов / Под ред. Ю.С. Фролова. – М.: «Желдориздат», 2001. – 528 с.
9. Я. В. Григорьевич. Автоматический расчет тиристорных схем. _X: Вища школа. При ХГУ. 1986. -159.
10. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат; 1986. - 416 с.: ил.
11. Г.Т. Анатольевна. И.В. Иванович. Тиристорные преобразователи с дроссельным насыщением для систем электропривода: Расчет и проектирование. Л. Энергия 1978. – 136с.
12. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с., ил.
13. Автоматизированное проектирование следящих приводов и их элементов [В.Ф.Казмиренко, М.В.Баранов, Ю.В.Илюхин и др.]; Под ред. В.Ф.Казмиренко.- М.:Энергоатомиздат, 1984.-240 с., ил.; 20 с.
14. Автоматизированное проектирование электрических машин: [Учеб. Пособие для вузов по спец. "Электромеханика" / Ю.Б.Бородулин, В.С.Мостейкис, Г.В.Попов, В.П.Шишкин]; Под ред. Ю.Б.Бородулина.- М.: Высш.шк., 1989.-276, [3] с.: ил.; 22 с.
15. Автоматизация проектирования в технологии машиностроения / [Редкол. : Ю.В. Тимофеев (отв. ред.) и др.]. – Харьков : Выща школа. Из-во при Харьк. гос. ун-те, 1989 - .- 22 с – (Вестн. Харьк. политехн. Ин-та).
16. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики : Респуб. межвед. науч. – техн. сб. (ХИРЭ им. М.К. Янгеля.) – Х.: Основа, 1965. – Вып. 98. 1992. 136 с.
17. Автоматизированный электропривод: [Сб. ст.] / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 542 с.

Навчальне видання

ДОНЕЦЬ Олександр Вадимович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з курсу

ТЕОРІЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ

*(для студентів 5 курсу всіх форм навчання та слухачів другої вищої освіти
спеціальності 7.05070203, 8.05070203 «Електричний транспорт»)*

Відповідальний за випуск *В. Х. Далека*

Редактор *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2010, поз. 74Л

Підп. до друку 16.05.2011

Друк на ризографі.

Зам. №

Формат 60×84/16

Ум. друк. арк. 5,1

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,

вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rektorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.